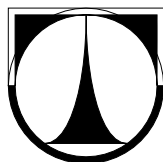


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Liberec 2012

**Filip Burda**

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

**Měření rozložení indexu lomu v optických materiálech  
s použitím diferenciální holografické interferometrie**

**Measurement of refractive index distribution in optical  
materials by differential holographic interferometry**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Autor: **Filip Burda**

Vedoucí práce: **Ing. Lédl Vít, Ph. D**

Konzultant: **Ing. Pavel Psota**

V Liberci 15. 5. 2012

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

FAKULTA MECHATRONIKY, INFORMATIKY A MEZIOBOROVÝCH INŽENÝRSKÝCH STUDIÍ

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Filip BURDA**

Osobní číslo: **M09000046**

Studijní program: **B 2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy**

Název tématu: Měření rozložení indexu lomu v optických materiálech s použitím  
diferenciální holografické interferometrie

Zadávací katedra: **Ústav řízení systémů a spolehlivosti**

### **Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :**

1. Prostudujte odbornou literaturu a vypracujte literární rešerši pojednávající základní principy holografie, holografické interferometrie a její využití při měření indexu lomu v optických materiálech.
2. Na základě rešerše navrhnete holografické uspořádání pro měření rozložení indexu lomu v optických materiálech.
3. Navržené uspořádání sestavte a proveďte měření rozložení indexu lomu daných optických materiálů.
4. Zpracujte naměřená data a v závěru zhodnoťte dosažené výsledky.

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedených zdrojů a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:

## Poděkování

Rád bych zde poděkoval Ing. Vítu Lédlovi Ph. D za vedení mé bakalářské práce a za cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Psotovi za jeho konzultace, pomoc s experimenty a za rady které pomohly ke zrealizování této práce.

# Abstrakt

Bakalářská práce se věnuje měření rozložení indexu lomu v optických materiálech pomocí diferenciální holografické interferometrie. Její první část se zabývá základními vlastnostmi holografie, digitální holografie a holografické interferometrie. Práce se dále věnuje návrhu a sestavení měřicího uspořádání pro detekování nehomogenit indexu lomu v transparentních materiálech. Je zde popsáno dané měření pomocí tohoto uspořádání prováděné metodou digitální holografické interferometrie. Posledním bodem je zpracování a vyhodnocení naměřených výsledků, které ukazují vliv nehomogenního rozložení indexu lomu v měřeném transparentním objektu na interferenční strukturu výsledného numericky vypočteného fázového pole.

**Klíčová slova:** digitální holografie, holografická interferometrie, měření rozložení indexu lomu, bezdotykové měření

# Abstract

This bachelor thesis deals with measurement of refractive index distribution in optical materials by differential holographic interferometry. The first part covers basic properties of holography, digital holography and holographic interferometry. The thesis also deals with design and build of the measuring arrangement for detecting inhomogeneities in the refractive index of transparent materials. It describes the measurement with this arrangement by the methods of digital holographic interferometry. The last point is the processing evaluation of measured results, which show the effect of inhomogeneous distribution of refractive index in a measured transparent object to the interference structure of the final numerically calculated phase field.

**Keywords:** digital holography, holographic interferometry, measurement of refractive index distribution, non-contact measurement

# Obsah

Úvod.....	12
1. Fyzikální principy optiky.....	13
1.1 Světlo .....	13
1.2 Zobrazení pomocí čoček.....	15
1.3 Vlnová rovnice.....	16
1.4 Poyntingův vektor a intenzita elektromagnetického záření.....	16
1.5 Interference .....	17
1.6.1 Youngův experiment.....	19
1.6.2 Michelsonův interferometr .....	20
1.6.3 Mach-Zenderův interferometr.....	21
1.6.4 Sagnacův interferometr.....	21
1.6 Koherence .....	22
1.5.1 Časová koherence .....	22
1.5.2 Prostorová koherence.....	24
1.7 Difrakce .....	25
1.7.1 Difrakce na štěrbíně .....	26
1.7.2 Difrakce na mřížce.....	26
1.8 Holografie .....	27
1.9 Digitální holografie.....	29
1.9.1 Záznam digitálního hologramu .....	29
1.10 Holografická interferometrie .....	30
1.10.1 Metoda dvojí expozice.....	30
1.10.2 Metoda měření v reálném čase .....	31
1.10.3 Phase shifting.....	31

1.11 Princip holografické interferometrie transparentních objektů .....	32
1.11.1 Holografický Mach-Zenderův interferometr .....	33
1.11.2 Holografický Michelsonův interferometr .....	34
1.11.3 Holografický dvouvlnový interferometr .....	35
2. Návrh a sestavení měřicího uspořádání .....	37
3. Měření rozložení indexu lomu ve vybraném materiálu .....	43
4. Vyhodnocení naměřených dat .....	45
Závěr .....	51
Seznam použité literatury .....	53



# Seznam obrázků

Obr. 1: Spektrum elektromagnetického záření .....	13
Obr. 2: Zákon odrazu .....	14
Obr. 3: Snellův zákon lomu .....	14
Obr. 4: Zobrazení spojkou .....	15
Obr. 5: Zobrazení rozptylkou.....	16
Obr. 6: Interferenční obrazec .....	18
Obr. 7: Youngův experiment .....	20
Obr. 9: Mach-Zenderův interferometr .....	21
Obr. 10: Sagnacův interferometr .....	21
Obr. 11: Časová koherence .....	22
Obr. 12: Komplexní stupeň časové koherence pro monochromatickou vlnu.....	23
Obr. 13: Komplexní stupeň časové koherence pro částečně koherentní vlnu .....	24
Obr. 14: Prostorová koherence .....	24
Obr. 15: Difrakce na štěrbině.....	26
Obr. 16: Rozložení intenzity difrakčního obrazce .....	26
Obr. 17: Princip holografie a) záznam hologramu b) rekonstrukce hologramu .....	28
Obr. 18: Záznam hologramu.....	28
Obr. 19: Rekonstrukce hologramu .....	28
Obr. 20: Ukázka digitálního hologramu .....	29
Obr. 21: Záznam digitálního hologramu.....	30
Obr. 22: Šíření světla v transparentních objektech .....	33
Obr. 23: Holografický Mach-Zenderův interferometr .....	34
Obr. 24: Holografický Michelsonův interferometr .....	35
Obr. 25: Holografický dvouvlnový interferometr.....	36
Obr. 26: Navržené měřicí uspořádání .....	38

Obr. 27: Dělič svazků .....	39
Obr. 28: Prostorový filtr.....	40
Obr. 29: Princip prostorové filtrace a kolimace.....	40
Obr. 30: Kolimační objektiv .....	41
Obr. 31: CCD kamera .....	41
Obr. 32: Sestavené měřicí uspořádání .....	42
Obr. 33: Měřené sklo ve stojanu .....	43
Obr. 34: Sestava skla s imerzí.....	44
Obr. 35: Měřicí sestava při měření .....	44
Obr. 36: Zaznamenaný digitální hologram a) pro referenční měření s imerzí, b) pro nehomogenní rozložení skla.....	45
Obr. 37: Fázové pole při měření v místě s homogenním rozložením indexu lomu.....	47
Obr. 38: Fázové pole při měření nehomogenního rozložení indexu lomu .....	47
Obr. 39: Filtrované fázové pole .....	48
Obr. 40: Výsledné fázové pole po rozbalení fáze .....	49
Obr. 41: Výsledné fázové pole při měření s různými hodnotami indexu lomu skla a imerze.....	50

## Seznam symbolů

Značka	Rozměr	Význam
$a$	$[m]$	vzdálenost rovin
$\mathbf{B}$	$[kg.s^{-1}.C^{-1}]$	vektor magnetické indukce
$c$	$[m.s^{-1}]$	rychlost světla
$d$	$[m]$	rozteč interferenčních proužků
$f$	$[Hz]$	frekvence
$\mathbf{E}$	$[V.m^{-1}]$	vektor intenzity elektrického pole
$F, F'$		ohniska
$g(\tau)$		komplexní stupeň koherence
$I$	$[W.m^2]$	intenzita světla
$\mathbf{k}$	$[m^{-1}]$	vlnový vektor
$\Delta l$	$[m]$	dráhový rozdíl
$L$	$[m]$	koherentní délka
$n$		index lomu
$\mathbf{r}$		polohový vektor
$\mathbf{S}$	$[m^2]$	Poyntingův vektor
$t$	$[s]$	čas
$T$	$[s]$	perioda
$T_k$	$[s]$	koherentní čas
$U$	$[J]$	energie
$y$		velikost zobrazovaného předmětu
$y'$		velikost obrazu
$\epsilon$	$[F.m^{-1}]$	permitivita
$\Delta \eta$	$[m]$	šířka pixelu
$\lambda$	$[m]$	vlnová délka
$\mu$	$[N.A^{-2}]$	permeabilita

$\Delta\xi$	[m]	šířka pixelu
$\rho$	[kg.m <sup>3</sup> ]	hustota
$\tau$	[s]	časové zpoždění
$\vartheta_d$	[rad]	úhel dopadu
$\vartheta_o$	[rad]	úhel odrazu
$\vartheta_l$	[rad]	úhel lomu
$\varphi$	[rad]	fázový rozdíl
$\omega$	[rad <sup>-1</sup> ]	úhlová frekvence
$\nabla$		Laplaceův operátor

# Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá měřením rozložení indexu lomu v optických materiálech za pomoci digitální holografické interferometrie. Motivací pro její vznik je fakt, že pomocí doposud používaných metod lze toto rozložení měřit pouze dvojrozměrně průměrováním přes celou délku objektu. Tato holografická metoda má však potenciál i pro rozšíření na určování přesných poloh měřených nehomogenit trojrozměrně, tedy v celém objemu. Díky tomu by tato metoda mohla být ze strany výrobců různých optických vybavení a laserů hojně využívána. Její využití by mělo být především při zpracování krystalů, kde by měla pomoci snížit odpad z těchto krystalů a zvýšit tak efektivitu výroby.

Další uplatnění této metody bude v právě realizovaném projektu Extreme Light Infrastructure v Dolních Břežanech u Prahy, kde se v současné době pracuje na výstavbě centra, ve kterém bude sestaven nejintenzivnější laser světa. Tento laser bude mít deskové aktivní prostředí tvořené tzv. slaby. V těchto deskách je ze zřejmých důvodů nezbytné mít homogenní rozložení indexu lomu, aby uvnitř nevznikaly parazitní jevy.

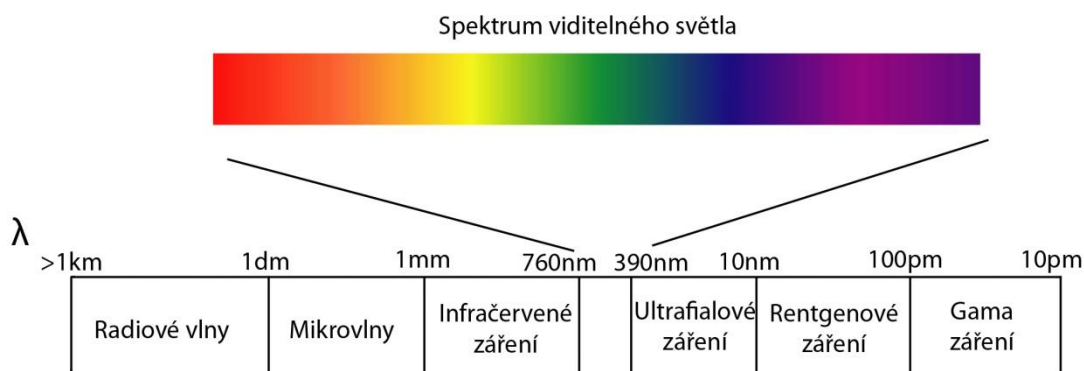
Holografická interferometrie je v současnosti velmi rozšiřující se obor. Je to především z důvodu širokých možností využití a velké přesnosti samotného měření. Další nespornou výhodou této metody je to, že se jedná o bezdotykovou měřicí metodu. Při jejím použití tedy není třeba kontakt s měřeným objektem a tím jeho ovlivňování. Tato metoda je také vhodná pro zkoumání různých vlastností transparentních objektů, a proto byla právě holografická interferometrie zvolena jako výhodný způsob měření rozložení indexu lomu v optických materiálech.

Prvním bodem této práce je průřez základními fyzikálními principy optiky, seznámení se s holografií a jejími vlastnostmi a s holografickou interferometrií. Jejím hlavním cílem je však navrhnout a sestavit měřicí uspořádání pro měření rozložení indexu lomu v optických materiálech a provést demonstrační měření pomocí diferenciální holografické interferometrie. Dalším krokem je pak vhodné zpracování naměřených dat a zhodnocení dosažených výsledků.

# 1. Fyzikální principy optiky

## 1.1 Světlo

Světlo je elektromagnetické vlnění o určité vlnové délce a frekvenci. Spektrum viditelného světla se nachází v rozmezí vlnových délek 390 nm a 760 nm. Nejdelší vlnovou délku má barva červená, nejkratší potom fialová barva. V pásmu mezi 10 nm a 390 nm se nachází ultrafialové záření a v pásmu 760 nm až 1 mm leží spektrum infračerveného záření. Na rozdíl od viditelného světla však tato dvě záření nejsou lidským okem detekovatelná.



Obr. 1: Spektrum elektromagnetického záření

Různé vlnové délky viditelného světla lidské oko vnímá jako různé barvy. Vlnová délka je závislá na frekvenci podle vztahu

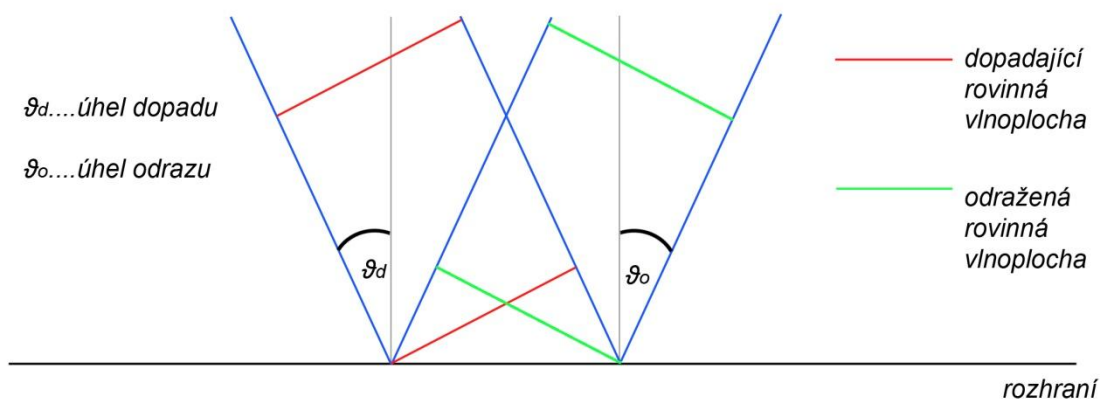
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

kde  $c$  je rychlost světla v prostředí, ve kterém se světlo šíří. Tato rychlost je odvozená od rychlosti světla ve vakuu  $c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$  vztahem

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (1.2)$$

kde  $n$  je index lomu daného prostředí. V důsledku různých rychlostí světla v prostředích s různými indexy lomu dochází na rozhraní těchto prostředí k odrazu a lomu světla.

Pro odraz světla na rozhraní dvou prostředí platí zákon odrazu, který říká, že pokud na dokonale rovné rozhraní dvou prostředí s různými indexy lomu dopadá světlo pod úhlem  $\vartheta_d$  a odráží se od rozhraní pod úhlem  $\vartheta_o$ , pak tyto úhly budou vždy stejné. Pro úhel dopadu a odrazu tedy platí, že  $\vartheta_d = \vartheta_o$ .

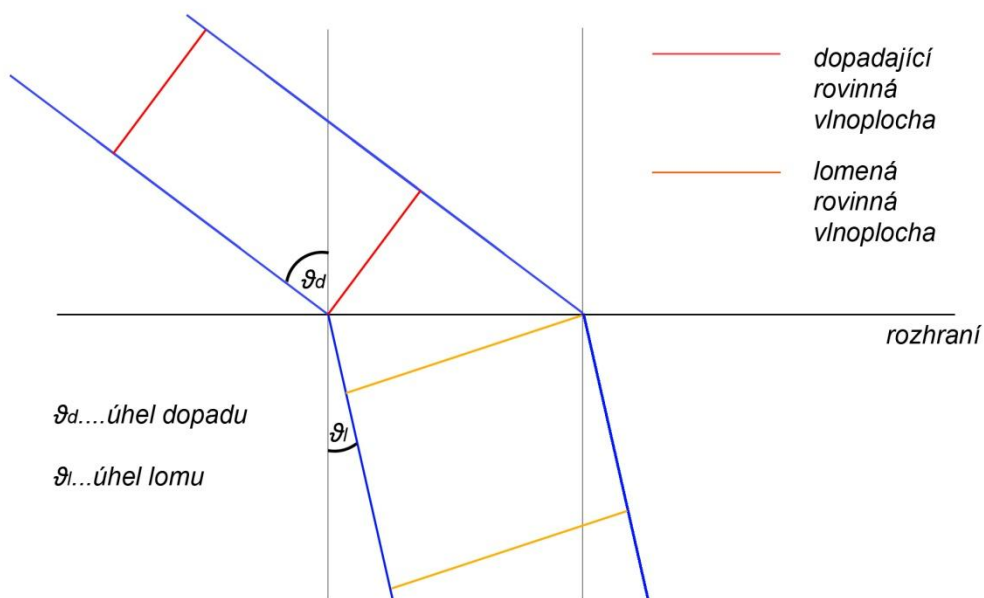


Obr. 2: Zákon odrazu

Pokud prochází světlo z prostředí o indexu lomu  $n_1$  do prostředí o indexu lomu  $n_2$ , mění se rychlost jeho šíření a tím také úhel, pod kterým se šíří. Na rozhraní těchto dvou prostředí tedy vzniká lom světla a platí Snellův zákon lomu

$$n_1 \sin \vartheta_d = n_2 \sin \vartheta_l \quad (1.3)$$

kde  $\vartheta_d$  je úhel dopadu světla na rozhraní a úhel  $\vartheta_l$  je úhel lomu.



Obr. 3: Snellův zákon lomu

Optické jevy mohou být popsány několika způsoby. Tím nejjednodušším je tzv. geometrická optika. V geometrické optice je světlo popsáno pomocí paprsků se zanedbáním vlnových vlastností světla. Pomocí této teorie lze vysvětlit jednoduché optické jevy, jako například výše zmíněný zákon odrazu a Snellův zákon lomu. Složitější optické jevy však pomocí geometrické optiky popsat nelze.

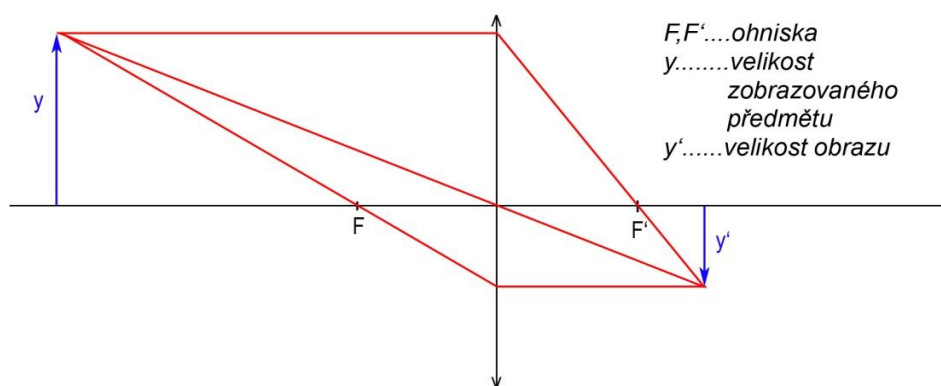
Přesnější teorií pro popis světla je vlnová optika. Vlnová optika vyobrazuje světlo jako elektromagnetické vlnění o určité vlnové délce a frekvenci, což může být často dostačující. Pro popis vlnové optiky lze také použít Huygensův princip, který říká, že body v prostoru, do kterých dorazilo vlnění, se stávají zdroji elementárních vln, jejichž obálka je vlnoplochou výsledného vlnění.

Popis, který zohledňuje také energii dopadajícího světla, se nazývá kvantová optika. Kvantová optika vyobrazuje světlo jako proud částic – fotonů o určité energii a hybnosti. V případě, kdy je potřeba zohlednit energii dopadajících fotonů, je výhodnější použít kvantový popis.

Pro potřeby této práce je možné energii fotonů zanedbat a vlnový popis světla je tedy v tomto případě plně dostačující.

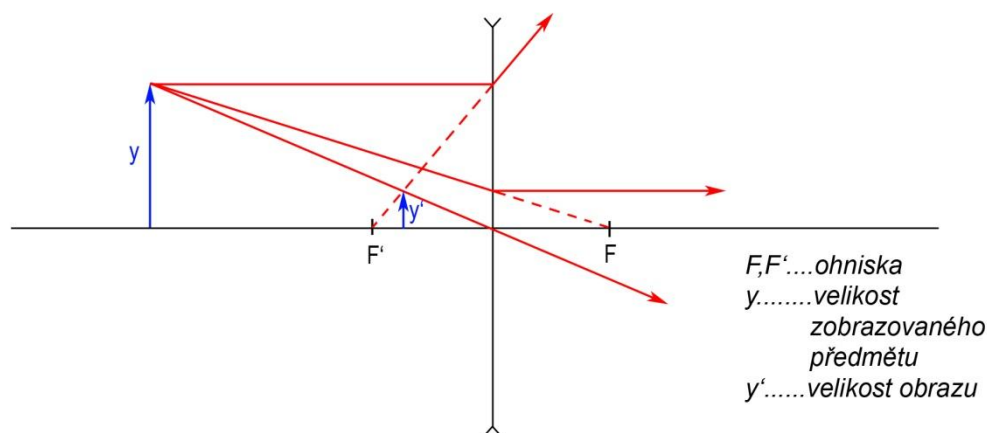
## 1.2 Zobrazení pomocí čoček

Každá čočka je jednoduchá optická soustava skládající se ze dvou kulových ploch nebo jedné kulové a jedné rovinné plochy. Zobrazení pomocí čoček lze popsat poměrně jednoduše geometrickou optikou. Čočky slouží pro upravování směru světelného paprsku šířícího se danou čočkou. Základními typy čoček jsou spojky a rozptylky. Zobrazení pomocí těchto čoček je znázorněno na obr. 4 a obr. 5.



Obr. 4: Zobrazení spojkou





Obr. 5: Zobrazení rozptylkou

### 1.3 Vlnová rovnice

Vlnová rovnice popisuje šíření elektromagnetických vln a vychází z Maxwellových rovnic, které popisují elektrické a magnetické pole. Pro šíření světla ve vakuu má podobu

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (1.4)$$

kde  $E$  je intenzita elektrického pole,  $t$  je časová souřadnice a  $\nabla$  je Laplaceův operátor

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (1.5)$$

$x$ ,  $y$  a  $z$  jsou souřadnice polohového vektoru  $\vec{r}$  ( $x, y, z$ ).

### 1.4 Poyntingův vektor a intenzita elektromagnetického záření

Intenzita elektromagnetického záření udává plošnou hustotu toku výkonu neboli energii, která projde plochou  $S$  za čas  $t$

$$I = \frac{dU}{dt} \frac{1}{S} \quad (1.6)$$

Intenzita je dána velikostí Poyntingova vektoru, který je definován jako vektorový součin intenzit elektrického a magnetického pole

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (1.7)$$

Po dosazení za intenzitu magnetického pole

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \times \vec{B}) \quad (1.8)$$

přičemž vektory  $\vec{E}$  a  $\vec{B}$  jsou na sebe vzájemně kolmé a protože platí

$$E_{\max} = c \cdot B_{\max} \quad (1.9)$$

pak je možné vyjádřit intenzitu elektromagnetického záření jako

$$I = \frac{E^2}{\mu_0 \cdot c} \quad (1.10)$$

Vzhledem k tomu, že intenzita elektrického pole klesá s první mocninou vzdálenosti od bodového zdroje, tak z (1.10) vyplývá, že intenzita elektromagnetického záření bude klesat se čtvercem vzdáleností od bodového zdroje (např. zářícího dipólu).

## 1.5 Interference

Pojem interference značí vzájemné ovlivňování dvou a více vln šířících se jedním prostředím. Podmínkou pozorovatelné interference je koherence interferujících vln, tedy jejich konstantní fázový rozdíl. Interferenci lze pozorovat pomocí vzniklého interferenčního obrazce neboli interferogramu v podobě tzv. interferenčních proužků na stínítku. Při sčítání vln platí princip superpozice. To znamená, že pokud se prostorem šíří dvě a více vln v jedné rovině, pak výsledná vlna bude dána součtem těchto vln

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i(\vec{r}, t) \quad (1.11)$$

Mějme monochromatické vlny, které jsou vyjádřeny funkcí s časovou harmonickou závislostí

$$\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - \vec{k}x + \delta) \quad (1.12)$$

kde  $E_0$  je amplituda dané vlny,  $\omega$  je úhlová frekvence,  $k$  značí vlnový vektor,  $x$  znázorňuje vzdálenost od zdroje a  $\delta$  je fázový posun. Při stejných frekvencích

sčítaných vln platí, že pro vlny tzv. ve fázi tedy vůči sobě s nulovým fázovým posunem bude vzniklá vlna maximálně zesílená. Pro vlny v protifázi tedy pro vlny, které jsou vůči sobě posunuty o  $\pi$  bude vzniklá vlna maximálně zeslabená. O tom zda v daném místě vzniká interferenční maximum nebo interferenční minimum rozhoduje dráhový rozdíl. Podmínka pro vznik interferenčního maxima je dána vztahem

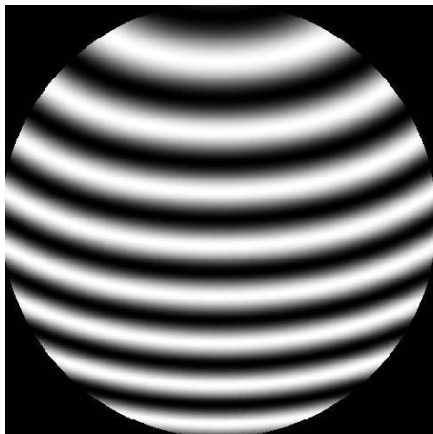
$$\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2} \quad (1.13)$$

kde  $k$  je řád interferenčního maxima a nabývá hodnot 1, 2, 3, 4 atd. Interferenční maximum tedy vzniká v případě, kdy je dráhový rozdíl  $\Delta l$  roven sudému násobku poloviny vlnové délky  $\lambda$ . Interferenční minimum vznikne, pokud je tento dráhový rozdíl roven lichému násobku poloviny vlnové délky

$$\Delta l = (2k - 1) \frac{\lambda}{2} \quad (1.14)$$

kde  $k$  značí řád interferenčního minima a nabývá opět celočíselných kladných hodnot.

Interferenční obrazec může vypadat například takto



Obr. 6: Interferenční obrazec [10]

Při interferenci rovinných vln o vlnové délce  $\lambda$ , které dopadají na fotografickou desku pod úhly  $\alpha_1, \alpha_2$ , dochází v oblasti překrytí svazků ke vzniku interferenčních rovin. Pro vzdálenost rovin  $a$  platí vztah

$$\frac{\lambda}{2a} = \sin \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \quad (1.15)$$

Rozteč interferenčních proužků  $d$  na desce lze pak spočítat ze vztahu

$$\frac{2a}{2d} = \cos \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \quad (1.16)$$

Dosazením z (1.15) do (1.16) získáme vzdálenost rozteče interferenčních proužků  $d$  na interferogramu

$$d = \frac{\lambda}{\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2} \quad (1.17)$$

Intenzita superpozice dvou a více vln však není obecně součtem intenzit jednotlivých vln a to právě kvůli vzniklé interferenci mezi těmito vlnami. Pro střední hodnotu intenzity dvou vln platí

$$I = \langle E_1 \rangle^2 + \langle E_2 \rangle^2 + 2 \langle E_1 E_2^* \rangle \quad (1.18)$$

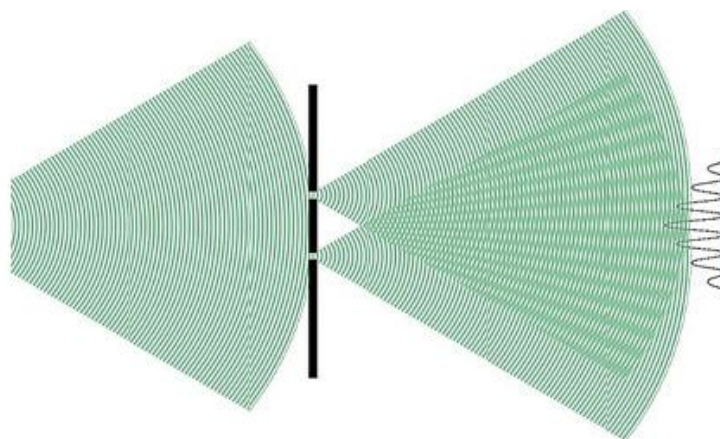
zde lze dosadit za  $E_1 = \sqrt{I_1} \cos(\varphi_1)$  a  $E_2 = \sqrt{I_2} \cos(\varphi_2)$ .  $I_1$  a  $I_2$  jsou intenzity jednotlivých vln a  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  jsou jejich fáze. Potom je celková intenzita dána tzv. interferenční rovnicí

$$I = I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi) \quad (1.19)$$

kde  $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ . Třetí člen v této rovnici  $\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi)$  se nazývá interferenční člen. V případě, že mezi vlnami nebude konstantní fázový rozdíl, bude se tento interferenční člen rychle měnit v čase a v prostoru. Pokud je však mezi vlnami konstantní fázový rozdíl, je možné pozorovat interferenci. V případě že bude menší než nula, jedná se o interferenci destruktivní, pokud bude kladný, pak je interference konstruktivní.

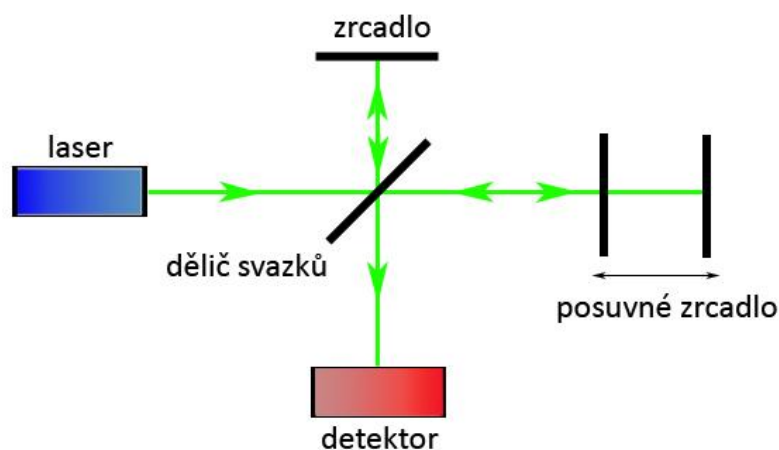
### 1.6.1 Youngův experiment

Youngův experiment je pokus, kterým Thomas Young pomocí interference dokázal, že světlo je vlnění. Světelný svazek dopadá na dvojštěrbinu. Po průchodu dvojštěrbinou se dopadající svazek rozdělí na dva, které spolu následně interferují, díky tomu na stínítku vzniknou interferenční proužky.



Obr. 7: Youngův experiment [11]

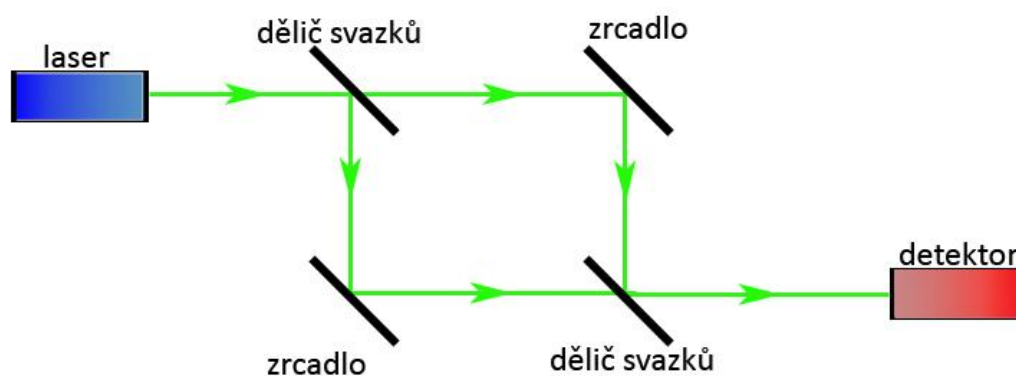
### 1.6.2 Michelsonův interferometr



Obr. 8: Michelsonův interferometr

Michelsonův interferometr má dvakrát větší citlivost než následující dva interferometry. Pro posun fáze např. o  $\pi/2$  stačí nastavit na posuvném zrcadle změnu pouze o  $\pi/4$ . Pomocí tohoto interferometru je možné měřit například nerovnosti na zrcadlovém povrchu nebo zkoumat časovou koherenci. Laser vysílá světelný svazek do děliče svazků, kde se svazek rozdělí na dva. Oba svazky dále postupují do zrcadel, z nichž jedno je nastavitelné. Poté se vracejí zpět do děliče svazků a navzájem spolu interferují.

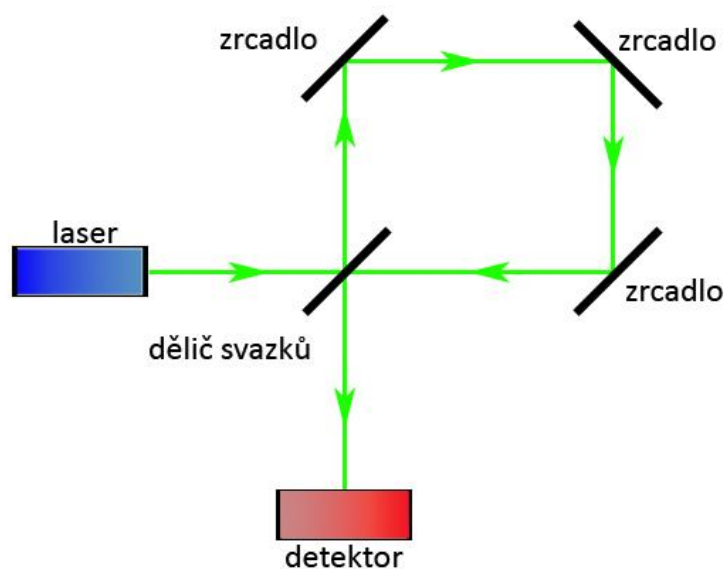
### 1.6.3 Mach-Zenderův interferometr



*Obr. 9: Mach-Zenderův interferometr*

Rozdíl mezi Mach-Zenderovým interferometrem a předchozím Michelsonovým je především v poloviční citlivosti Mach-Zenderova interferometru. V tomto případě svazek vyslaný laserem je rozdělen na děliči svazků. Tyto rozdělené svazky jsou dále pomocí zrcadel usměrňovány na další dělič svazků, kde spolu vzájemně interferují.

### 1.6.4 Sagnacův interferometr



*Obr. 10: Sagnacův interferometr*

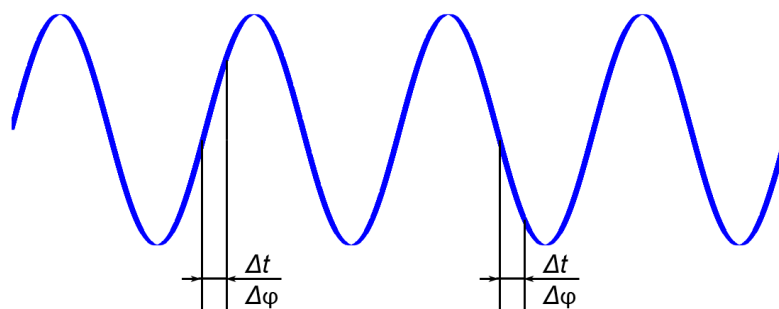
U Sagnacova interferometru je svazek po rozdělení rotován pomocí zrcadel a přiváděn zpět na dělič svazků, kde interferuje s původním svazkem. Sagnacův interferometr může být použit pro měření rychlosti rotace.

## 1.6 Koherence

Aby výše uvedené jevy byly pozorovatelné, je třeba použít koherentní zdroj záření. Koherence je pojem, který označuje určité vlastnosti vlnění. Vlnění je koherentní, pokud má konstantní frekvenci a fázový rozdíl vyzařovaných paprsků. Rozlišují se dva typy koherence a to koherence časová a koherence prostorová.

### 1.5.1 Časová koherence

Mějme elektromagnetickou vlnu, která prochází bodem v prostoru v určitém čase  $t$  a  $(t+\Delta t)$ . Tato vlna může být označena jako časově koherentní pokud pro toto  $\Delta t$  je konstantní rozdíl fází  $\Delta\varphi$  dané elektromagnetické vlny v libovolném čase  $t$ . Na časovou koherenci má zásadní vliv zda je zdroj vlnění monochromatický či nikoliv.



Obr. 11: Časová koherence

Důležitým parametrem každého koherentního zdroje záření je koherentní délka. Koherentní délka udává největší dráhový rozdíl, v němž lze považovat záření za koherentní. Koherentní délka je dána vztahem

$$L = \frac{c}{\Delta f} \quad (1.20)$$

kde  $c$  je rychlost šíření daného záření a  $\Delta f$  je změna frekvence vyzařujícího zdroje. Ze vztahu (1.20) lze odvodit vztah pro koherenční čas  $T_k$ . Koherenční čas je čas, za který světlo o rychlosti  $c$  projde celou koherentní délkou  $L$

$$T_k = \frac{L}{c} \quad (1.21)$$

Časová koherence popisuje tzv. autokorelaci, což je případ, kdy funkce koreluje sama se sebou v různých časových okamžicích  $E^*(t)$ ,  $E(t + \tau)$ , kde  $\tau$  je časové zpoždění. Časovou koherenci lze popsat pomocí vzájemné koherentní funkce

$$G(\tau) = \langle E^*(t)E(t + \tau) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T E^*(t)E(t + \tau) d\tau \quad (1.22)$$

Pomocí koherentní funkce lze vyjádřit komplexní stupeň časové koherence

$$g(\tau) = \frac{G(\tau)}{G(0)} \quad (1.23)$$

a po dosazení za koherentní funkce

$$g(\tau) = \frac{\langle E^*(t)E(t + \tau) \rangle}{\langle E(t)^2 \rangle} \quad (1.24)$$

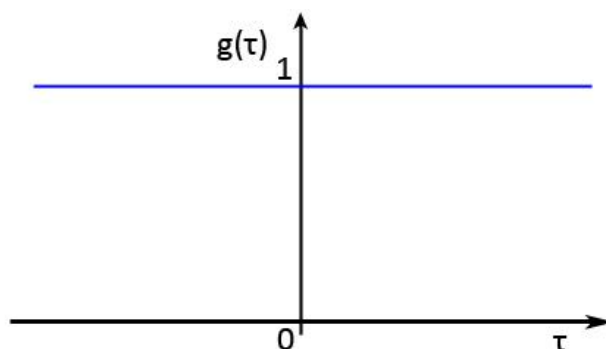
přičemž platí, že pro nekoherentní vlnění bude  $g(\tau)=0$  pro ideálně koherentní vlnění  $g(\tau)=1$ . Obecně tedy platí

$$0 \leq |g(\tau)| \leq 1 \quad (1.25)$$

Pomocí rovnic (1.18) a (1.24) lze odvodit interferenci pro částečně koherentní vlnění

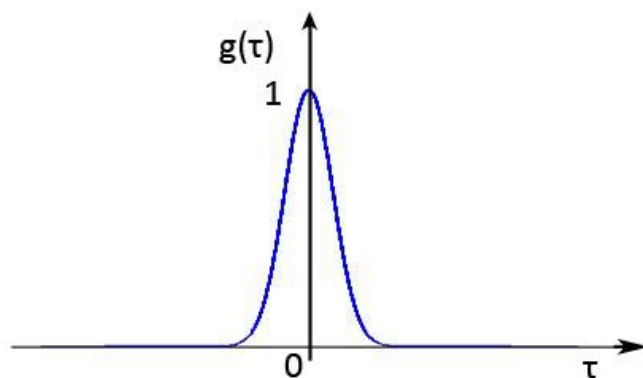
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |g(\tau)| \cos \varphi \quad (1.26)$$

Komplexní stupeň časové koherence tedy popisuje schopnost vln vzájemně interferovat, resp. popisuje, zda lze interferenci pozorovat, protože mezi sebou interferují i vzájemně nekoherentní vlny, ale interferenční obrazec se pak mění velmi rychle v čase a není tedy možné pozorovat interferenční jevy.



Obr. 12: Komplexní stupeň časové koherence pro koherentní monochromatickou vlnu

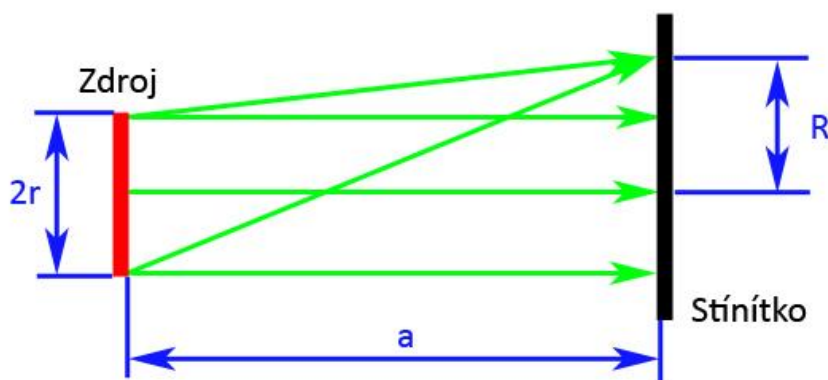




Obr. 13: Komplexní stupeň časové koherence pro částečně koherentní vlnu

### 1.5.2 Prostorová koherence

Pokud dvěma body v prostoru prochází vlnoplocha, fázový rozdíl mezi těmito dvěma body bude v daném čase roven nule. Jestliže tato podmínka platí v libovolném čase a pro libovolné dva body této vlnoplochy, můžeme tuto vlnu označit jako prostorově koherentní. Prostorovou koherenci výrazně ovlivňuje velikost zářící plochy zdroje. Prostorovou koherenci lze vyjádřit pomocí koherentní šířky, která je vzdáleností na stínítku mezi osou vyslaného svazku a místem, ve kterém při interferenci paprsků šířících se od okrajů použitého zdroje vzniká minimum intenzity. Rozdíl drah těchto paprsků musí být ze vztahů (1.13) a (1.14) roven  $\lambda/2$ . Koherentní šířka je funkcí příčné velikosti zdroje  $2r$ , vlnové délky  $\lambda$  a vzdálenosti zdroje od stínítka  $a$ .



Obr. 14: Prostorová koherence

Z obr. 14 lze odvodit vztah

$$\frac{\lambda}{2} = \sqrt{a^2 + (R+r)^2} - \sqrt{a^2 + (R-r)^2} \quad (1.27)$$

Vzhledem k tomu, že  $a \gg 2r$ , pak lze napsat

$$\frac{\lambda}{2} = \left[ a + \frac{(R+r)^2}{2a} \right] - \left[ a + \frac{(R-r)^2}{2a} \right] \quad (1.28)$$

a po úpravách

$$R = \frac{a}{2r} \frac{\lambda}{2} \quad (1.29)$$

Pro popis prostorové koherence je stejně jako v případě časové koherence možné použít autokorelační funkci, která však v tomto případě nebude závislá pouze na čase ale také na vzdálenostech  $r_1, r_2$

$$G(r_1, r_2, \tau) = \langle E^*(r_1, t) E(r_2, t + \tau) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T E^*(r_1, t) E(r_2, t + \tau) d\tau \quad (1.30)$$

dále lze opět vyjádřit komplexní stupeň koherence

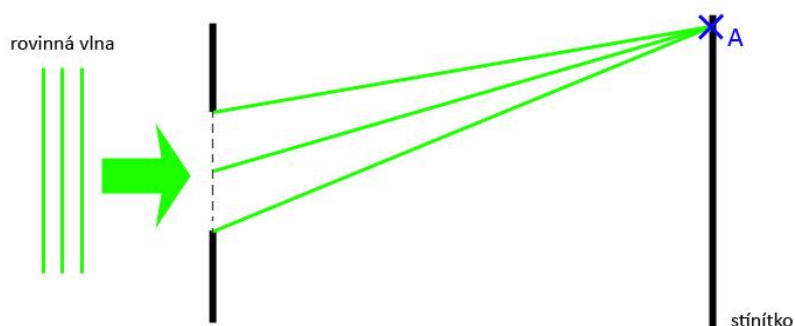
$$g(r_1, r_2, \tau) = \frac{\langle E^*(r_1, t) E(r_2, t + \tau) \rangle}{\langle E(r_1, t)^2 \rangle} \quad (1.31)$$

## 1.7 Difrakce

Difrakce je optický jev, kdy se světlo ohýbá na hranách překážek a proniká tak i do oblasti geometrického stínu. Difrakci světla lze pozorovat pouze tehdy, pokud jsou rozměry překážek úměrné vlnové délce světla. Odkloněné paprsky mohou spolu interferovat stejně tak jako s paprsky neodkloněnými. Difrakce ve svazku rovnoběžných paprsků se nazývá Fraunhoferova difrakce, v ostatních případech jde o Fresnelovu difrakci. Při Fraunhoferově difrakci vzniká difrakční obrazec blízko předmětu, při Fresnelově vzniká v „nekonečnu“ (vzdálenost stínítka je mnoho násobně větší než rozměr štěrby).

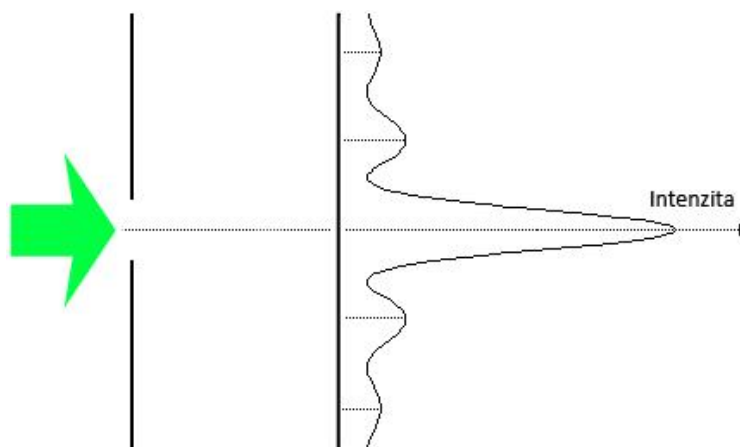
### 1.7.1 Difrakce na štěrbině

Pokud na štěrbinu dopadá rovinná vlna, část záření se ohýbá a druhá část se šíří dál původním směrem. Hrany štěrbinu se chovají jako elementární zdroje záření, odkud se svazky šíří do všech směrů. Na obrázku jsou vidět svazky, které vycházejí z krajních bodů štěrbinu a dopadají do bodu A na stínítku. V tomto bodě pak dochází k interferenci obou vln.



Obr. 15: Difrakce na štěrbině

Difrakční obrazec, který vznikne na stínítku, je symetrický podle osy štěrbinu, která difrakci způsobila. Na difrakčním obrazci jsou zobrazena difrakční maxima a minima. Největší intenzita difrakčního maxima je v ose štěrbinu.



Obr. 16: Rozložení intenzity difrakčního obrazce

### 1.7.2 Difrakce na mřížce

Difrakční mřížkou se rozumí soustava vysokého množství štěrbin. Je tedy třeba počítat s interferencí vln vystupujících z různých štěrbin i s difrakcí na jednotlivých štěrbinách. Interferenční obrazec je v tomto případě modulován difrakčním. Difrakční

obrazec má velmi úzká maxima i minima. Rozteč jednotlivých štěrbin  $a$  v mřížce je dána vztahem

$$a = k \frac{\lambda}{\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2} \quad (1.32)$$

kde  $k$  je celé číslo,  $\alpha_1$  je úhel dopadu záření a  $\alpha_2$  je úhel ohybu záření. V případě sinusové mřížky může  $k$  nabývat pouze hodnot  $k = \pm 1$ .

## 1.8 Holografie

Holografie je forma optického záznamu, která registruje mimo amplitudy světelné vlny také její fázi. Záznam holografie se nazývá hologram. Hologram je transparent obsahující uloženou interferenční strukturu světelné vlny. Díky schopnosti detekovat také fázi, je možné zachytit a poté také zrekonstruovat trojrozměrný obraz, což pomocí fotografií a kamerových záznamů nelze.

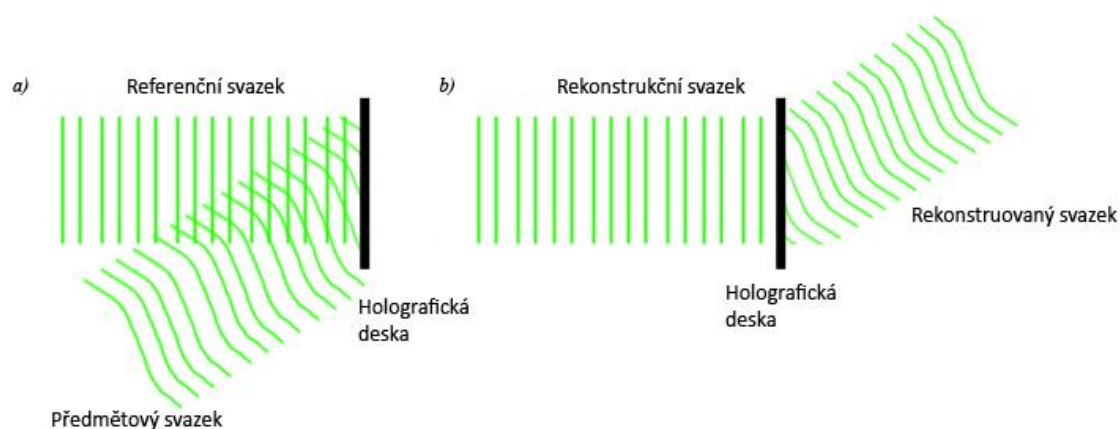
Při holografickém záznamu dopadají na holografickou desku dva svazky, svazek referenční  $E_r$  a svazek předmětový  $E_p$  (odražený od zaznamenávaného předmětu). Aby tyto svazky byly navzájem koherentní, musí vycházet se stejného zdroje koherentního světla. Tyto svazky spolu interferují a vytvoří hologram. Pro rekonstrukci hologramu je potřeba osvětlit transparent rekonstrukčním svazkem, který je shodný se svazkem referenčním. Na interferenční struktuře pak dojde k difrakci paprsků a vytvoří se rekonstruovaný svazek, který je shodný se svazkem předmětovým a vytvoří v prostoru trojrozměrný obraz původního předmětu. Transparent je definován jako

$$t \approx E_r^2 + E_p^2 + E_p E_r^* + E_p^* E_r \quad (1.33)$$

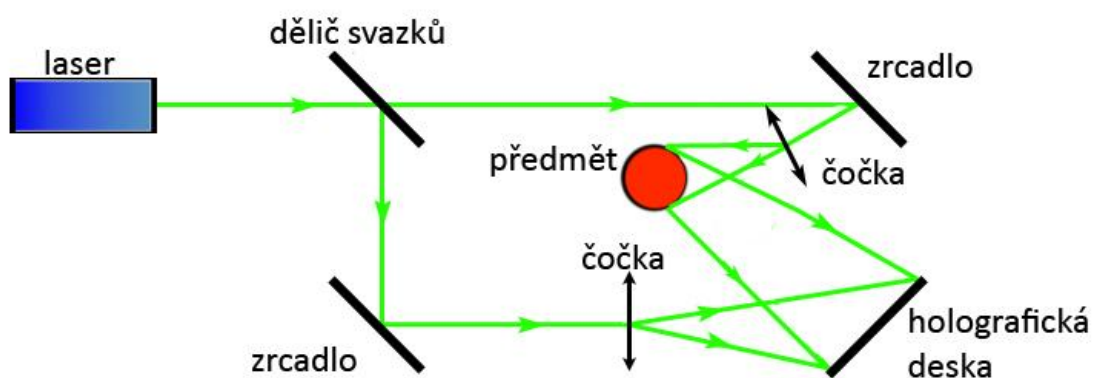
a nese kódovanou informaci o intenzitě a fázi předmětového svazku. Výsledkem rekonstrukce hologramu je rekonstruovaný svazek, který má podobu

$$E = tE_r \approx I_r E_r + I_p E_r + I_r E_p + I_r E_p^* \quad (1.34)$$

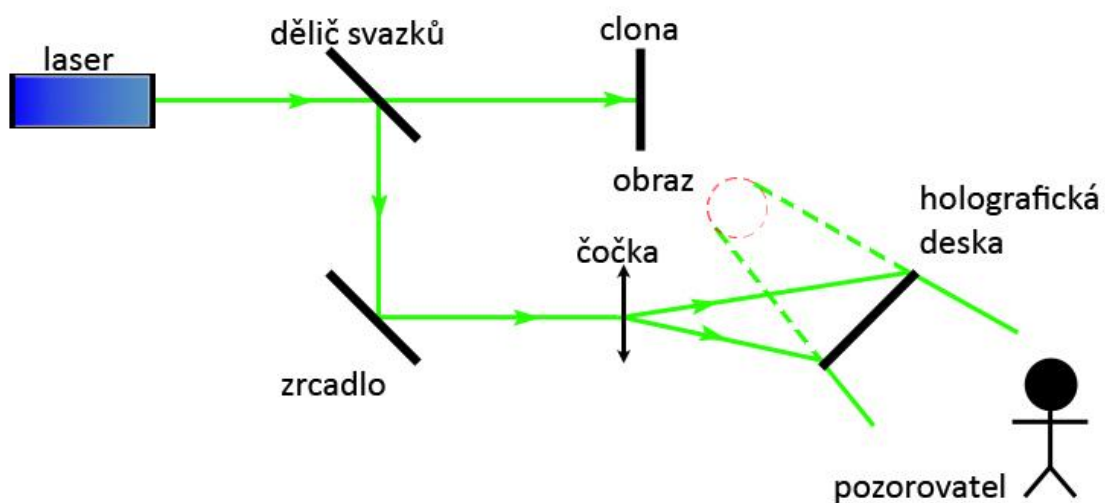
kde vlna  $I_r E_p$  nese informaci o tvaru vzorku, a  $I_r E_p^*$  je vlna k ní komplexně sdružená.



Obr. 17: Princip holografie a) záznam hologramu b) rekonstrukce hologramu



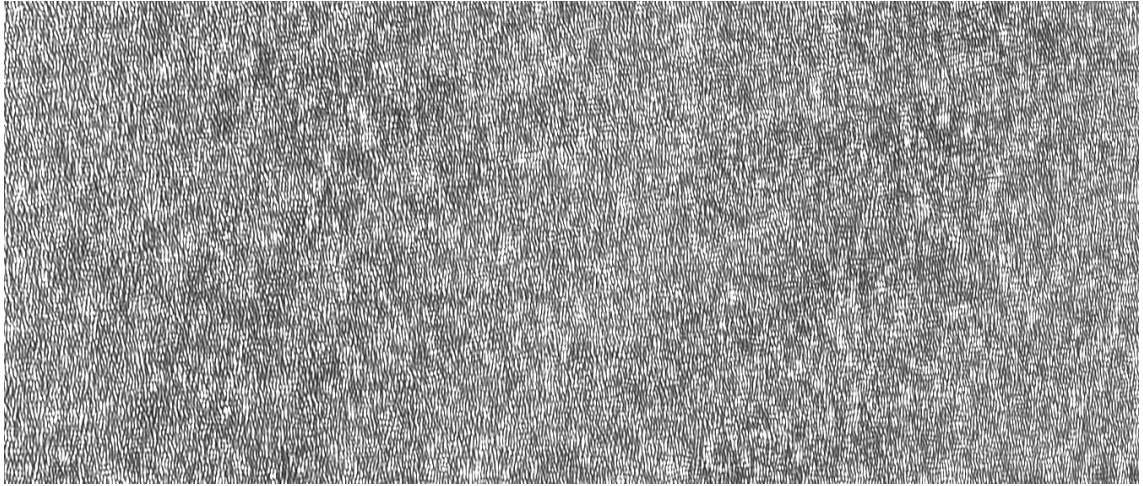
Obr. 18: Záznam hologramu



Obr. 19: Rekonstrukce hologramu

## 1.9 Digitální holografie

Rozdíl mezi klasickou a digitální holografií je ve způsobu záznamu hologramu. V případě klasické holografie je hologram zaznamenán na holografickou desku a později vyvolán, podobně jako je to u fotografického filmu. Při použití digitální holografie je hologram snímán CCD kamerou a uložen v počítači pro pozdější zpracování.



*Obr. 20: Ukázka digitálního hologramu*

### 1.9.1 Záznam digitálního hologramu

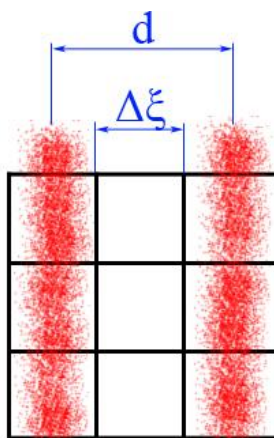
Při zaznamenávání digitálního hologramu vzniká oproti klasickému záznamu požadavek na maximální úhel mezi objektovou a referenční vlnou. Během záznamu na holografickou desku je možné zachytit i velmi tenké interferenční proužky, ale v případě digitální kamery zde vzniká omezení dané Shannon-Kotelníkovým teorémem. Na obr. 21 je vidět výřez několika pixelů při ukládání hologramu na CCD kameru. Z obrázku vyplývá, že vzdálenost interferenčních proužků  $d$  musí být minimálně dvakrát větší, než je šířka jednoho pixelu  $\Delta\xi$ . Protože vzdálenost interferenčních proužků je dána vztahem

$$d = \frac{\lambda}{\sin \theta} \quad (1.35)$$

kde  $\theta$  je úhel mezi interferujícími vlnami, pak platí

$$\theta_{\max} = \arcsin \frac{\lambda}{2\Delta\xi} \quad (1.36)$$

kde  $\theta_{\max}$  je maximální úhel mezi interferujícími vlnami, při kterém bude ještě možné na kameru zaznamenat jejich interferenci.



Obr. 21: Záznam digitálního hologramu

## 1.10 Holografická interferometrie

Holografická interferometrie je optická měřicí metoda, která vychází z vlastností holografie a umožňuje měřit u difúzních objektů mikroskopické posuvy, vibrace, deformace povrchů apod. a u transparentních objektů lze měřit například rozložení hustot, teplot, koncentrací apod. Její princip spočívá v porovnání dvou stavů měřeného objektu, které jsou zaznamenány v různých časech. Tato práce se zabývá měřením rozložení indexu lomu v optických materiálech a holografická interferometrie v transparentních objektech je ideální metodou pro takovéto měření.

### 1.10.1 Metoda dvojí expozice

Při měření metodou dvojí expozice jsou na holografickou desku postupně zaznamenány dva předmětové svazky zaznamenané v různých časech a stavech měřeného objektu. Výsledný záznam je pak tvořen dvěma hologramy, které po osvětlení rekonstrukčním svazkem vytvoří dva rekonstruované svazky, které spolu vzhledem ke koherenci zdroje interferují a vytvoří interferogram, s interferenčními proužky odpovídajícími změně fáze mezi oběma vlnami. Změna fáze obou interferujících vln odpovídá velikosti změny měřeného objektu. Při měření transparentních objektů výsledný interferogram vypovídá o rozložení indexu lomu v měřeném objektu vůči

referenčnímu rozložení. Nevýhodou této metody je možnost měření pouze dvou stavů daného objektu.

### 1.10.2 Metoda měření v reálném čase

U metody měření v reálném čase je na holografickou desku nejprve zaznamenán hologram předmětu v prvním (referenčním) stavu. Pokud je hologram po vyvolání umístěn přesně do původní polohy a osvětlen vlnou, která je shodná s referenční vlnou, při jeho exponování vznikne rekonstruovaná vlna, která vytvoří obraz původního předmětu. Pokud je předmět ve stejné poloze jako při exponování prvního hologramu, budou se hologramem šířit dvě předmětové vlny a to reálná předmětová vlna a rekonstruovaná předmětová vlna. Pokud bude mít měřený transparentní předmět stejné rozložení indexu lomu, jako tomu bylo v referenčním stavu, budou tyto vlny totožné a rozložení intenzity bude stejné jako při prvním holografickém záznamu. Pokud bude však rozložení indexu lomu rozdílné, pak spolu budou tyto dvě vlny interferovat a vzniklé interferenční proužky budou odpovídat změnám rozložení indexu lomu v transparentním předmětu. Pro rozdíl fází jednotlivých vln rovný lichým násobkům  $\pi$  se na povrchu předmětu objeví tmavé proužky, pro rozdíl fází rovný sudým násobkům  $\pi$ , pak se objeví světlé proužky. Výhodou této metody je především možnost srovnávat libovolný počet stavů se stavem referenčním, kdy interferenční proužky dávají informaci o okamžitém stavu měřeného objektu.

### 1.10.3 Phase shifting

Hlavní problém při zpracování naměřených výsledků z digitální holografické interferometrie je výpočet interferenční fáze. Phase shifting je vyhodnocovací metoda, která umožňuje vypočítat interferenční fázi  $\Delta\varphi$  nahráním několika interferogramů, kde fáze interferujících vln jsou posunuty o známý úhel a směr mezi jednotlivými snímky. Výhodou této metody je výrazně větší přesnost a dobré výsledky i při nízkých kontrastech interferenčních proužků. Fáze je zde vypočítávána pro každý pixel zvlášť. Výsledkem je rozložení fází na mřížce bodů. Pro vypočítání fáze jsou potřeba alespoň tři interferogramy. Intenzita pro jednotlivé snímky se pak spočítá ze vzorců



$$\begin{aligned}
I_1 &= A(x, y) + B(x, y) \cos(\Delta\varphi) \\
I_2 &= A(x, y) + B(x, y) \cos(\Delta\varphi + \alpha) \\
I_3 &= A(x, y) + B(x, y) \cos(\Delta\varphi + 2\alpha)
\end{aligned}
\tag{1.37}$$

kde  $A(x, y)$  a  $B(x, y)$  jsou intenzity závislé na souřadnicích  $x, y$  a  $\Delta\varphi$  je hledaná proměnná. Úhel  $\alpha$  je v tomto případě  $120^\circ$ , protože jsou zvoleny tři interferogramy.

V případě zvolení čtyř interferogramů budou rovnice vypadat takto

$$\begin{aligned}
I_1 &= A(x, y) + B(x, y) \cos(\Delta\varphi) \\
I_2 &= A(x, y) + B(x, y) \cos(\Delta\varphi + \alpha) \\
I_3 &= A(x, y) + B(x, y) \cos(\Delta\varphi + 2\alpha) \\
I_4 &= A(x, y) + B(x, y) \cos(\Delta\varphi + 3\alpha)
\end{aligned}
\tag{1.38}$$

a je pak možné hledané  $\Delta\varphi$  vyjádřit bez znalosti úhlu  $\alpha$  v případě, že tento úhel bude konstantní pomocí vztahu

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{\sqrt{I_1 + I_2 - I_3 - I_4} \cdot \sqrt{3I_2 - 3I_3 - I_1 + I_4}}{I_2 + I_3 - I_1 - I_4}
\tag{1.39}$$

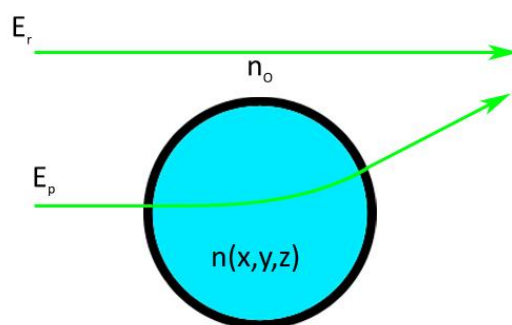
## 1.11 Princip holografické interferometrie transparentních objektů

Pokud prochází světlo transparentním objektem s nehomogenním rozložením indexu lomu  $n(x, y, z)$ , dochází v důsledku různých rychlostí šíření světla v prostorech s různým indexem lomu ke změně fázového posuvu vlny a také k zakřívování směru šíření vlny. Změna optické dráhy  $\Delta l$  předmětového svazku  $E_p$  (svazku který prochází transparentním předmětem) vůči referenčnímu svazku  $E_r$ , který prochází okolním prostředím s indexem lomu  $n_0$  je dána křivkovým integrálem po dráze předmětového svazku

$$\Delta l(x, y) = \oint [n(x, y, z) - n_0] dz
\tag{1.40}$$

Z rovnice (1.40) je zřejmé, že změna optické dráhy je funkcí rozložení indexu lomu, a proto je měření pomocí holografické interferometrie vhodné provádět s objekty, které

vykazují pouze malé změny indexu lomu, kde je možné zakřivení směru šíření daného svazku zanedbat. V případě, kdy toto zakřivení zanedbat nelze, je potřeba nejprve vyhodnotit interferogram za předpokladu, že se svazky šíří rovnoběžně bez zakřivení a poté aplikovat korekce na zakřivení směru šíření.



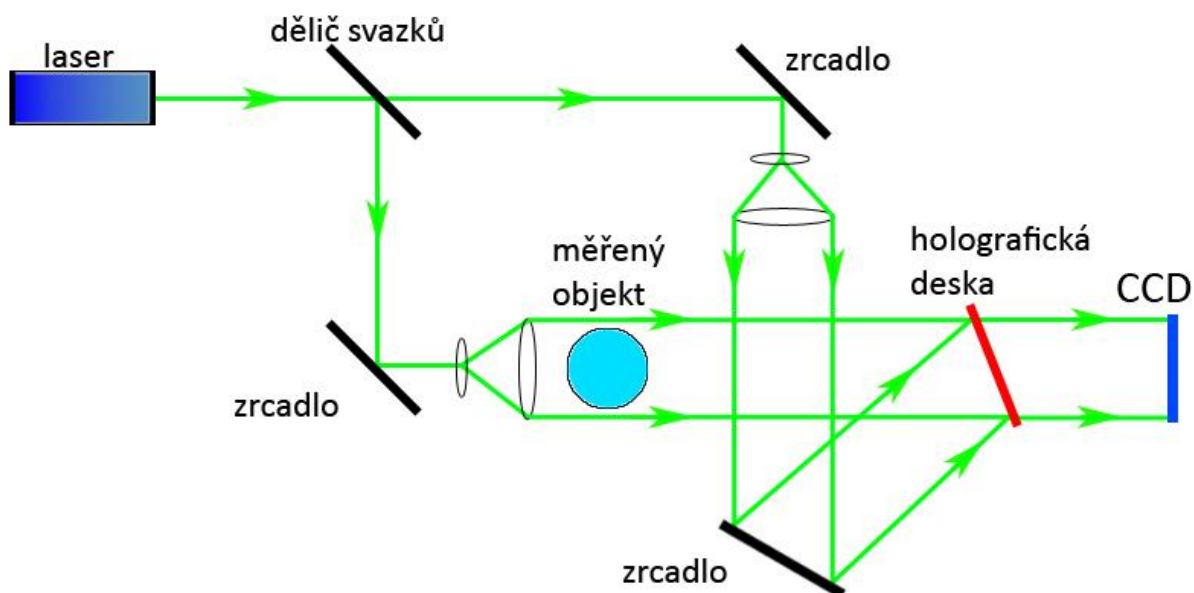
*Obr. 22: Šíření světla v transparentních objektech*

Při měření lze interferometr pomocí děliče paprsků seřídít na tzv. konečnou a nekonečnou šířku interferenčních proužků. Při seřízení interferometru na nekonečnou šířku interferenčních proužků prochází předmětová vlna děličem přímo a referenční vlna je odkloněna do směru předmětové vlny. V referenční oblasti interferogramu se objeví nekonečně široký interferenční proužek, který znázorňuje homogenní okolí měřeného objektu. Při seřízení na konečnou šířku interferenčního proužku je referenční vlna odkloněna do směru, který svírá s předmětovou vlnou jistý úhel, který určuje hustotu interferenčních proužků v referenční oblasti. V případě nehomogenit měřeného objektu se pak tyto proužky deformují.

### 1.11.1 Holografický Mach-Zenderův interferometr

Holografický Mach-Zenderův interferometr je rozšířením jeho běžné verze na holografickou. Světelná vlna vyslaná z laseru se nejprve na děliči paprsků rozdělí na předmětovou vlnu  $E_p$  a referenční vlnu  $E_r$ . Předmětová vlna se odráží v zrcadle, prochází čočkami, kde je upravena na vlnu o větším průměru, prochází měřeným transparentním předmětem a dopadá na holografickou desku. Referenční vlna se odráží ve druhém zrcadle, je čočkami upravena na vlnu o stejném průměru jako předmětová vlna a je dalším zrcadlem směřována na holografickou desku, kde interferuje s předmětovou vlnou.

V případě kdy se měří nehomogenity v transparentním objektu, je třeba provést nejprve záznam referenčního objektu bez nehomogenit, holografickou desku vyvolat a umístit ji zpět do sestavy. Poté ji osvětlit rekonstrukční vlnou, z čehož se vytvoří rekonstruovaná předmětová vlna  $E'_p$ , která je shodná s původní předmětovou vlnou a představuje referenční rozložení indexu lomu v měřicím prostoru. Tato rekonstruovaná vlna interferuje s reálnou předmětovou vlnou  $E_p$  ovlivněnou nehomogenitami měřeného objektu. Vzniklá interference, která je obrazem nehomogenit měřeného předmětu, je snímána průmyslovou CCD kamerou. Je tedy možné pozorovat změny rozložení nehomogenit v transparentním objektu v reálném čase.

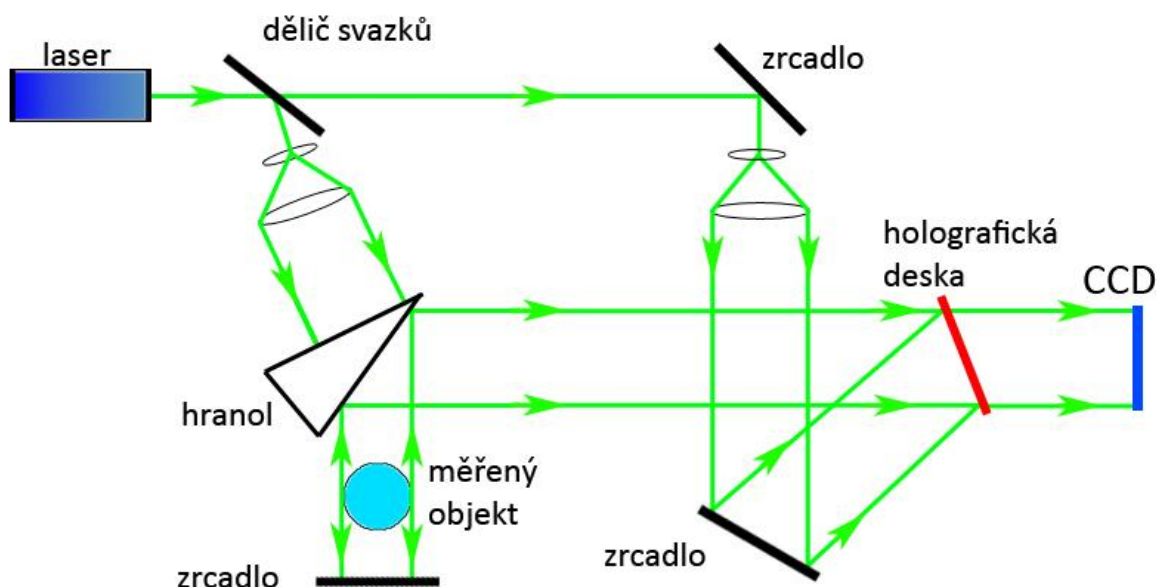


Obr. 23: Holografický Mach-Zenderův interferometr

### 1.11.2 Holografický Michelsonův interferometr

Holografický Michelsonův interferometr má oproti holografickému Mach-Zenderovu interferometru větší citlivost ale horší přesnost. Světelná vlna vyslaná laserem se opět na děliči paprsků rozdělí na předmětovou vlnu  $E_p$  a referenční vlnu  $E_r$ . Předmětová vlna je upravena čočkami na vlnu o větším průměru a je usměrněna hranolem tak, aby prošla měřeným předmětem, za kterým se odrazí v zrcadle. Poté znovu prochází měřeným předmětem a na hranolu se odráží na fotografickou desku. Referenční vlna je pomocí čoček upravena na větší průměr a pomocí zrcadel

usměrněna také na holografickou desku, kde interferuje s předměťovou vlnou. Postup měření v reálném čase je stejný jako u holografického Mach-Zenderova interferometru.



Obr. 24: Holografický Michelsonův interferometr

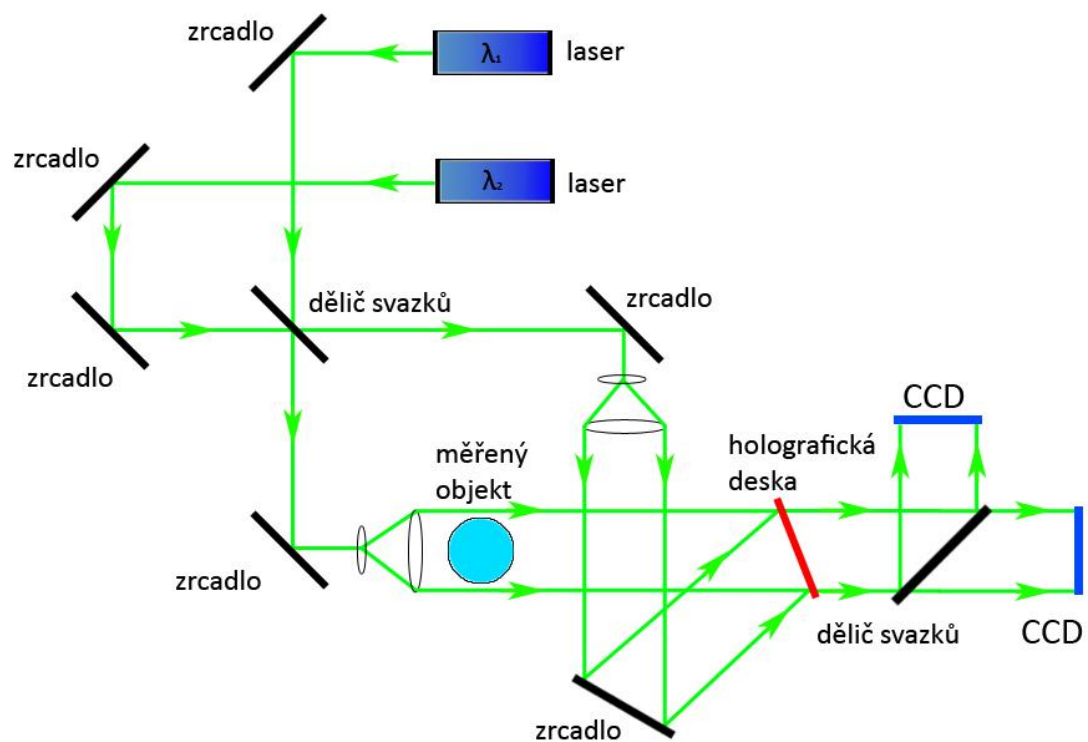
### 1.11.3 Holografický dvouvlnový interferometr

U tohoto interferometru jsou využity dva lasery o různých vlnových délkách, protože v některých případech může být změna indexu lomu  $dn$  změnou hustoty prostředí  $d\rho$  a změnou koncentrace látky v prostředí  $dx$  dle vztahu

$$dn = \left( \frac{\partial n}{\partial \rho} \right) d\rho + \left( \frac{\partial n}{\partial x} \right) dx \quad (1.41)$$

V těchto případech lze použít metodu dvouvlnové interferometrie, protože index lomu je zároveň funkcí vlnové délky.

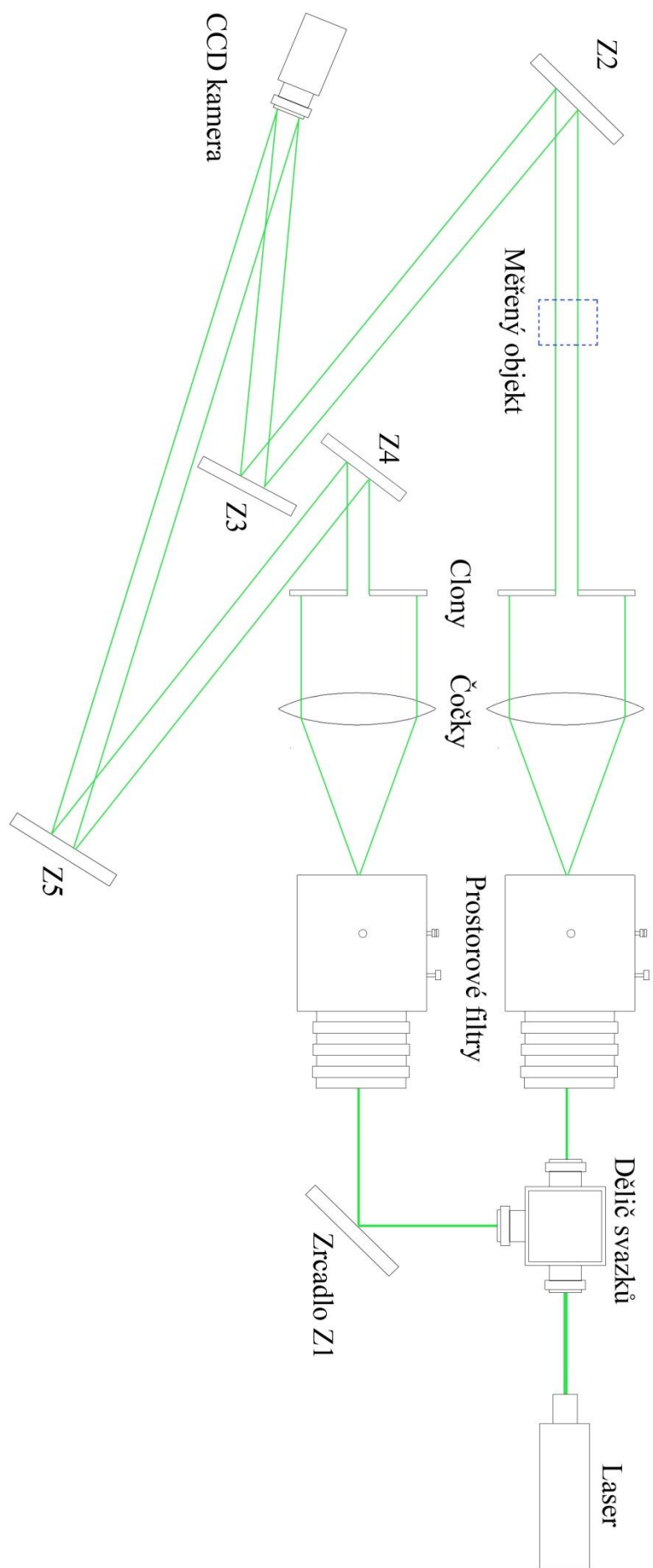
Mimo toho, že jsou zde využity dva světelné zdroje, je princip obdobný jako u dvou předchozích holografických interferometrů s tím, že pro záznam se využívají dvě CCD kamery, každá pro jednu vlnovou délku.



Obr. 25: Holografický dvouvlňový interferometr

## 2. Návrh a sestavení měřicího uspořádání

Prvním krokem pro provedení měření rozložení indexu lomu v optických materiálech bylo navržení měřicího uspořádání. Tento návrh vychází principiálně z Mach-Zenderova interferometru a to z důvodu výhodných vlastností pro dané měření. Rozdíl mezi klasickým holografickým Mach-Zenderovým interferometrem a navrženým měřicím uspořádáním je především v tom, že namísto holografické desky, která se používá v klasické holografii, je zde použita CCD kamera. Digitální holografická interferometrie je zde použita z důvodu rychlejšího zpracování a možnosti přesného výpočtu výsledného fázového pole. Další výhodou digitální holografie je to, že naměřené výsledky mohou být dále filtrovány, interferenční fázi lze demodulovat a výsledky lépe vyhodnotit. Jako demonstrační materiál pro měření bylo zvoleno sklo z výzkumného centra TOPTEC, protože k tomuto sklu byla dostupná i imerze o stejných optických vlastnostech. Úplné schéma navrženého měřicího uspořádání je na obr. 26.



Obr. 26: Navržené měřicí uspořádání

Prvním členem měřícího uspořádání je zdroj světla, což je zde laser. V tomto případě je použit  $\text{Nd}^{3+}$ :YAG laser Coherent compass 315 M, který vysílá svazek o vlnové délce 532 nm (zelené světlo) s maximálním výkonem 100 mW a koherentní délkou 10 m. Vzhledem k této koherentní délce nebylo nutné dbát na délku jednotlivých svazků, protože nehrozilo překročení koherentní délky.

Dalším prvkem je dělič svazků, který je složen z dvojlomného krystalu, který část svazku propustí a druhá část se láme kolmo na průchozí svazek. Výsledné svazky mají na sebe navzájem kolmou polarizaci, a proto jsou v děliči svazků na výstupech umístěny půlvlnné destičky, jejichž natočením lze nastavit stejnou polarizaci pro oba výsledné svazky. Půlvlnná destička je umístěna i na vstupu děliče a to z důvodu možnosti měnit polarizaci vstupního svazku a tím nastavovat poměr jejich intenzit vystupujících z děliče. To je důležité vzhledem k tomu, že při měření pomocí holografické interferometrie obvykle dochází k útlumu předmětového svazku průchodem měřeného objektu, případně odrazem od měřeného objektu. Oba svazky by při dopadu na snímací kameru měly mít stejnou intenzitu, a proto je potřeba nastavit výrazně větší intenzitu u předmětového svazku než u svazku referenčního.



*Obr. 27: Dělič svazků*

Dalším členem měřícího schématu je prostorový filtr. Tento člen slouží pro zlepšení vnitřní struktury svazku. Prostorový filtr se skládá z mikroskopového objektivu a dírkové clony. Objektiv rozšiřuje úzký svazek z laseru, aby bylo možné měřit rozložení indexu lomu v objektech běžných velikostí. Toto rozšíření svazku sebou však nese parazitní interferenční a difrakční jevy vznikající na malých částech



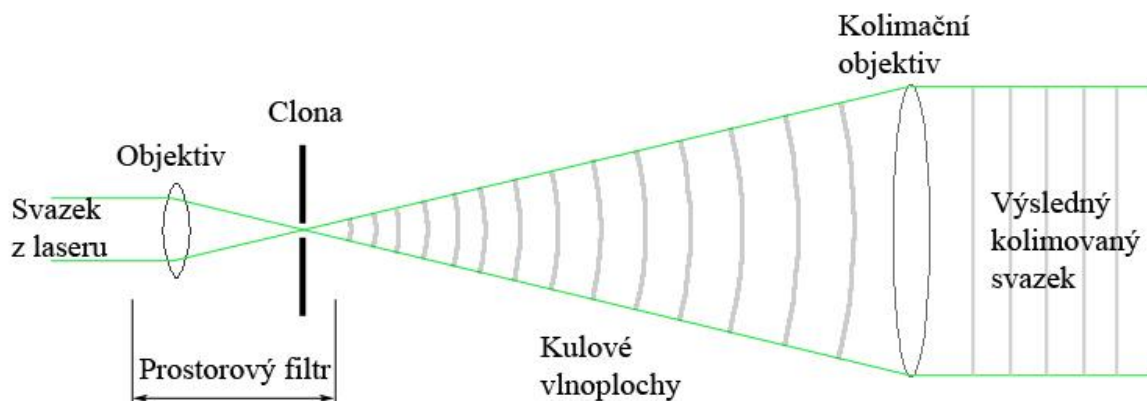
prachu, povrchových vadách apod. Proto je v prostorovém filtru zařazena dírková clonka, která při správném nastavení do ohniskové vzdálenosti objektivu tyto jevy potlačuje a vzniká tak svazek nezatížený parazitní difrakcí a šumem.

Použitý prostorový filtr je vidět na obr. 28. V jeho přední části je zařazen objektiv, který lze posouvat ve vodorovném směru tak, aby clonka ležela přesně v jeho objektové vzdálenosti. Clonku lze nastavovat do její ideální polohy pomocí dvou šroubů, které umožňují její pohyb v dalších dvou osách.

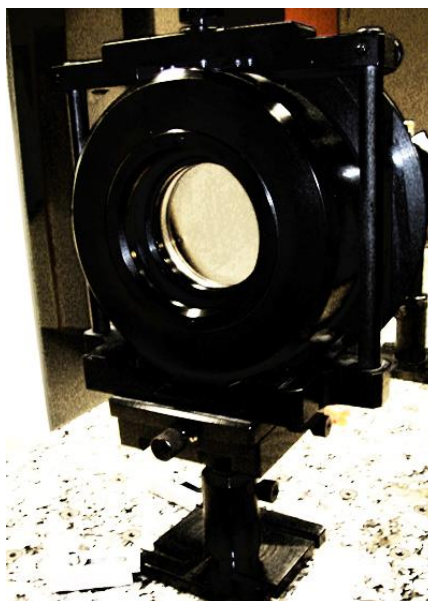


*Obr. 28: Prostorový filtr*

Výstupem z prostorového filtru je rozšiřující se svazek složený z částí kulových vlnoploch. Tento svazek je potřeba dále převést na svazek kolimovaný, což je svazek složený z rovinných vlnoploch. To je provedeno pomocí kolimačního objektivu. Princip prostorové filtrace a kolimace je ukázán na obr. 29.



*Obr. 29: Princip prostorové filtrace a kolimace*



*Obr. 30: Kolimační objektiv*

Světelný svazek je dále upraven na potřebnou šířku pomocí jednoduché clonky. Předmětový svazek prochází měřeným objektem a je usměrňován do požadovaného směru pomocí zrcadel. Zrcadla Z2 a Z3 odrážejí předmětový svazek do objektivu CCD kamery zrcadla Z4 a Z5 směřují do stejného místa svazek referenční. Při usměrňování těchto svazků je potřeba splnit podmínku vyplývající z (1.36).

Posledním členem měřicího uspořádání je CCD kamera. CCD je zkratka pro Charged Coupled Devices tedy nábojově vázané prvky. Kamera využívá fotoefektu, kdy dopadající světlo uvolní elektrony, které tvoří náboj. Náboj je udržován v tzv. potenciálových stupních neboli pixelech, které jsou tvořeny sítí elektrod na ploše CCD čipu. Intenzita dopadajícího světla je úměrná velikosti náboje. Informace o intenzitě na jednotlivých pixelech je dále odeslána do počítače pro další zpracování.



*Obr. 31: CCD kamera*



*Obr. 32: Sestavené měřicí uspořádání*

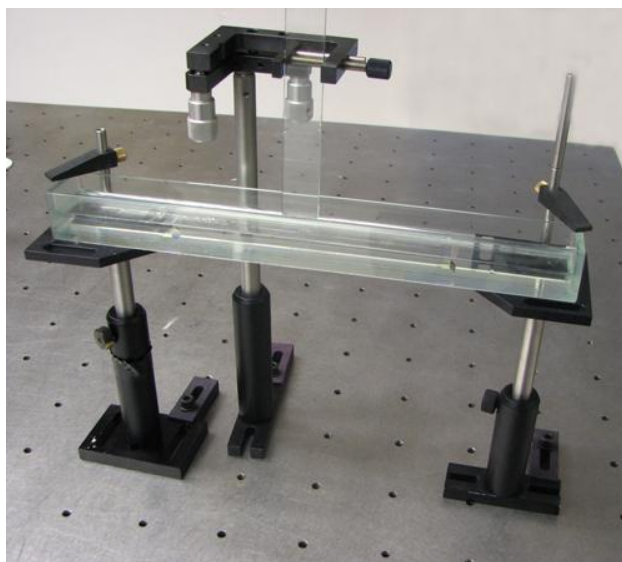
### 3. Měření rozložení indexu lomu ve vybraném materiálu

Jako materiál pro demonstrační měření bylo zvoleno sklo, ve kterém byly v některých místech viditelné nehomogenity. Toto sklo je zobrazeno na obr. 33. Pro měření tohoto materiálu byla dále potřeba imerze se stejnými optickými vlastnostmi (tedy se stejným indexem lomu, stejnou absorpcí, odrazivostí apod.) jako zvolený materiál. Proto byl použit dibutylester kyseliny fialové, který tyto parametry pro daný materiál splňuje. Další potřebou pro měření byla nádoba pro tuto imerzi. Jako nádoba byla vybrána skleněná kádinka. Sestava je vidět na obr. 34.



*Obr. 33: Měřené sklo ve stojanu*





*Obr. 34: Sestava skla s imerzí*

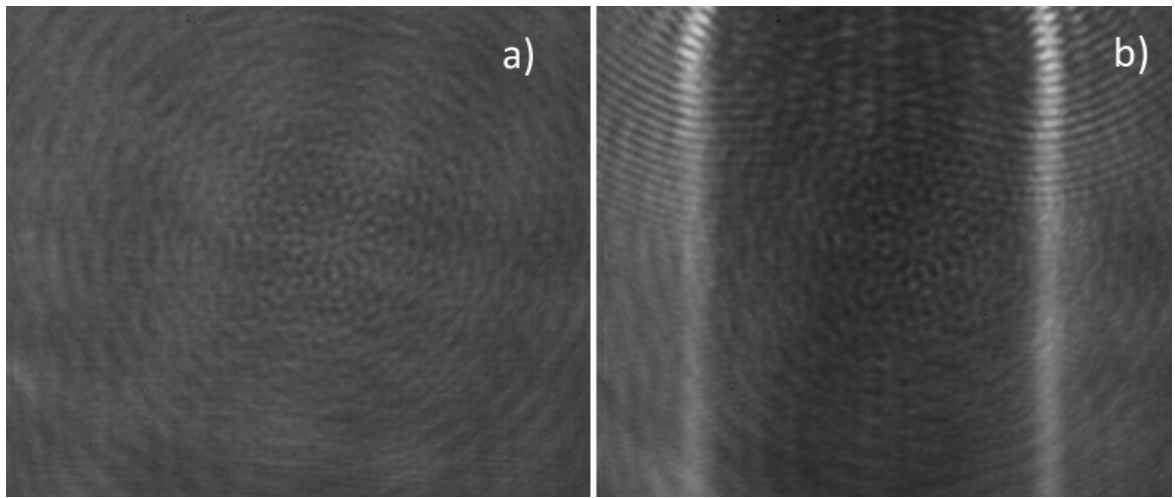
První měření je vždy referenční. Referenční měření probíhá tak, že se jako měřený objekt zvolí nádoba s imerzí takovým způsobem, aby svazek celým svým průřezem procházel v měřicím místě imerzí. V tomto bodě je důležité, aby veškeré členy měřicího uspořádání byly dobře uchycené a tedy i měřený objekt, což je v tomto případě nádoba s imerzí. Vzhledem k tomu, že tato metoda měří s přesností vlnových délek světla, tak i sebemenší posun může znehodnotit měření. Ve chvíli, kdy je vše připraveno, je možné začít měřit. Po zapnutí laseru se tedy do počítače uloží snímek vytvořený CCD kamerou. Dalším krokem je ponoření měřeného skla do již připravené imerze. Poté je možné uložit do počítače objektový snímek. Na obr. 35 je vidět měřicí sestava při měření.



*Obr. 35: Měřicí sestava při měření*

## 4. Vyhodnocení naměřených dat

Naměřená data jsou v podobě snímků z CCD kamery. Pro každé měření jsou potřeba dva snímky a to referenční a objektový. Tyto snímky jsou hologramy z jednotlivých měření. V tomto případě je referenční hologram zaznamenáním interferenční struktury pro nádobu s imerzí a při snímání objektového hologramu se do této nádoby ponoří měřené sklo. Vytvořené digitální hologramy při referenčním měření a měření v místě skla s nehomogenním rozložením indexu lomu jsou na obrázku 36.



Obr. 36: Zaznamenaný digitální hologram a) pro referenční měření s imerzí, b) pro nehomogenní rozložení skla

Vyhodnocení těchto dvou snímků se vypočítává numericky pomocí skriptu v programu Matlab. Díky tomu, že holografickou metodou je zaznamenána na snímcích nejen amplituda, ale i fáze, tak je možné numericky vypočítat rozdíl mezi vlnami tvořícími referenční a objektový hologram. Při výpočtu se vychází z Fresnelovy difrakce řešené pomocí Sommerfeldova integrálu

$$E[x, y] = \frac{1}{j\lambda} \iint f(\xi, \eta) E_r^*(\xi, \eta) \frac{1}{r} e^{jkr} d\xi d\eta \quad (4.1)$$

kde  $r = \sqrt{d^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2}$ ,  $[x, y]$  jsou souřadnice daného bodu,  $f$  je propustnost hologramu a  $E_r^*$  je referenční vlna. Tento integrál je diskretizován a pro rekonstruované pole pak platí

$$E[x, y] = e^{j\pi\lambda d \left( \left( \frac{x}{N\Delta\xi} \right)^2 + \left( \frac{y}{M\Delta\eta} \right)^2 \right)} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M f(k\Delta\xi, l\Delta\eta) E_r^*(k\Delta\xi, l\Delta\eta) e^{\frac{j\pi}{\lambda d} ((k\Delta\xi)^2 + (l\Delta\eta)^2)} e^{-j2\pi \left( \frac{kx}{N} + \frac{ly}{M} \right)} \quad (4.2)$$

$d$  je vzdálenost CCD kamery od měřeného objektu,  $\Delta\xi$  a  $\Delta\eta$  jsou rozměry pixelů použité CCD kamery. Intenzitu v každém bodě  $[x, y]$  lze vyjádřit jako

$$I_i[x, y] = |E_i[x, y]|^2 \quad (4.3)$$

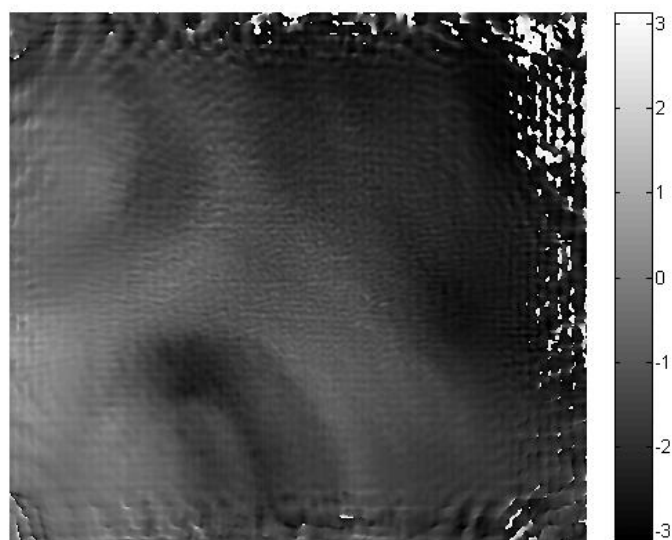
kde  $i=1$  pro referenční stav a  $i=2$  pro měřící stav. Pro fázi pak platí

$$\varphi_i[x, y] = \arctan \frac{\text{Im}\{E_i[x, y]\}}{\text{Re}\{E_i[x, y]\}} \quad (4.4)$$

Pro vyhodnocení rozdílu referenčního stavu s imerzí a měřícího stavu při měření se vypočítává rozdíl fází mezi referenční a objektovou vlnou.

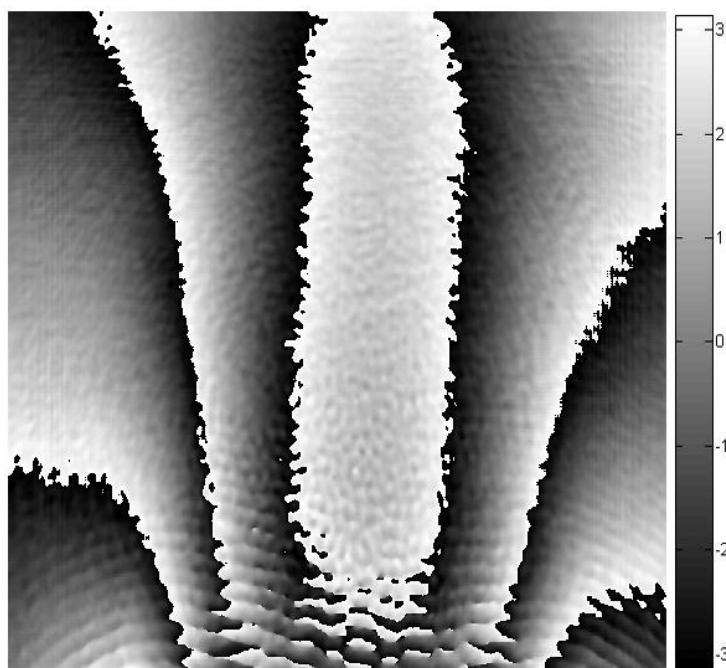
$$\Delta\varphi[x, y] = \varphi_2[x, y] - \varphi_1[x, y] \quad (4.5)$$

V ideálním případě, kdy by měl měřený materiál dokonale homogenní rozložení indexu lomu v měřeném místě, tak by bylo vidět na výsledném vypočteném fázovém poli pouze černé nebo případně bílé pozadí. Jednotlivé interferenční struktury by se v tom případě dokonale odečetly. Pokud je v měřeném objemu nějaká změna indexu lomu, zobrazí se to na výsledném fázovém poli odpovídající interferenční strukturou. Na obr. 37 je vidět fázové pole při měření v místě, kde bylo rozložení indexu lomu v daném objemu téměř dokonale homogenní. Je tedy vidět, že se referenční a objektový hologram téměř dokonale odečetly.



*Obr. 37: Fázové pole při měření v místě s homogenním rozložením indexu lomu*

Na dalším obrázku je vidět výsledné fázové pole při měření stejného skla, avšak v místě s viditelnou šlírou, tedy v místě kde byla výrazná změna rozložení indexu lomu. Tato změna se na výsledném interferogramu projevila odpovídající interferenční strukturou, která označuje místo s danou nehomogenitou.



*Obr. 38: Fázové pole při měření nehomogenního rozložení indexu lomu*



Toto fázové pole lze pomocí digitálního filtru vyhladit. Pro tuto filtraci je potřeba nejprve spočítat

$$\begin{aligned} s[x, y] &= \sin(\Delta\varphi[x, y]) \\ c[x, y] &= \cos(\Delta\varphi[x, y]) \end{aligned} \quad (4.6)$$

Vzhledem k tomu, že  $s[x, y]$  a  $c[x, y]$  neobsahují ostré přechody na rozdíl od  $\Delta\varphi$ , je možné tyto složky dále filtrovat konvolučním filtrem. Konvoluce je dána vztahy

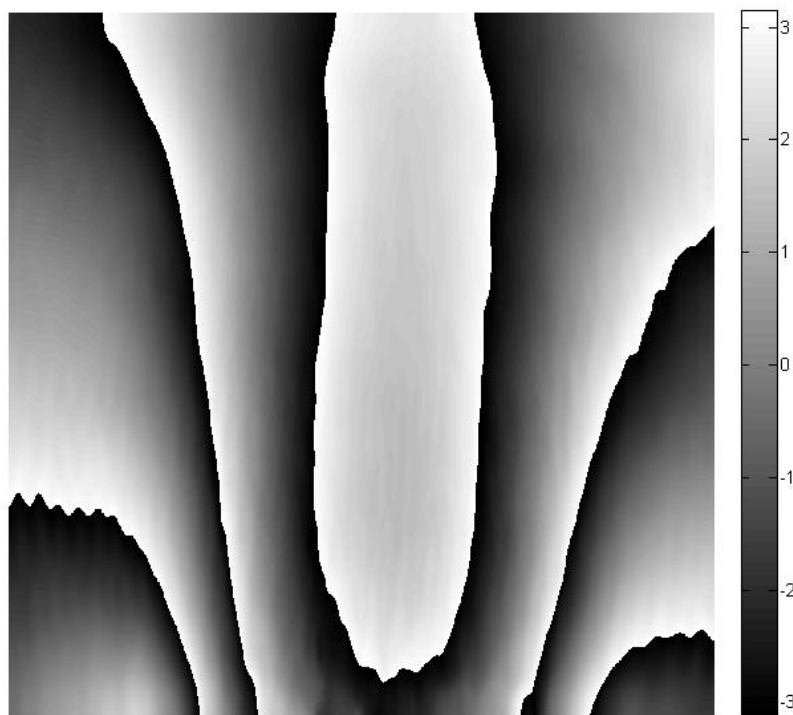
$$\begin{aligned} \text{Re}\{E_F\} &= \text{Re}\{E\} * j \\ \text{Im}\{E_F\} &= \text{Im}\{E\} * j \end{aligned} \quad (4.7)$$

kde operátor  $*$  představuje konvoluci a  $j$  je jádro, které může vypadat např.

$$j = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

Filtrovaná interferenční fáze se pak získá z

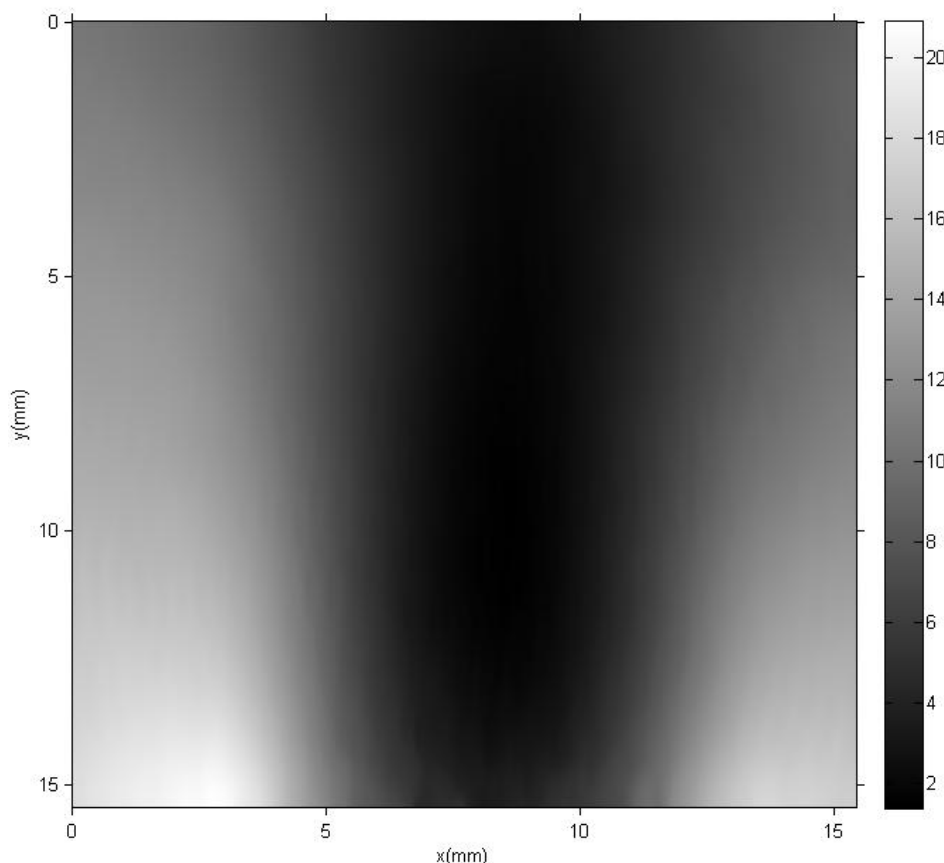
$$\Delta\varphi_F[x, y] = \arctan \frac{s_F[x, y]}{c_F[x, y]} \quad (4.9)$$



Obr. 39: Filtrované fázové pole

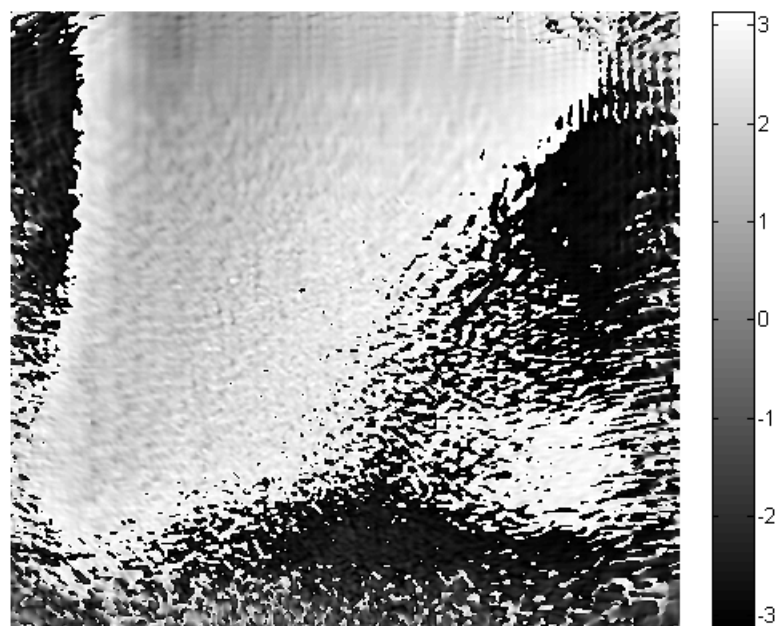
Pro získání spojitého fázového pole je potřeba interferenční fázi demodulovat, čímž jsou vyhlazeny ostré přechody mezi sousedními hodnotami fází. Demodulace nebo také rozbalení probíhá podle Goldsteinova algoritmu, kde spojnice mezi dvěma sousedními body je definována:

$$d(\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2) = \min \{ |\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2|, |\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 + 2\pi|, |\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 - 2\pi| \} \quad (4.10)$$



*Obr. 40: Výsledné fázové pole po rozbalení fáze*

Důležitým parametrem během měření byly stejné hodnoty indexu lomu imerze a měřeného materiálu. Tyto hodnoty jsou citlivé i na tisícinu indexu lomu. Pokud není toto pravidlo dodrženo, dochází k nežádoucím efektům při měření a měření nelze provést. Příklad výsledku takového fázového pole je vidět na obr. 41. V tomto případě bylo zvoleno měřené sklo s homogenním rozložením indexu lomu, ale zvolená imerze měla rozdílný index lomu než měřené sklo. Proto je na výsledném hologramu vidět interferenční struktura a samotné sklo se v imerzi, do které je ponořené, chová jako nehomogenita. Z tohoto důvodu je důležité dbát na stejné hodnoty indexu lomu skla a imerze.



*Obr. 41: Výsledné fázové pole při měření s různými hodnotami indexu lomu skla a  
imerze*

## Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo studium metod měření pro rozložení indexu lomu v pevných transparentních materiálech. Dále zpracování informací o základních principech holografie, holografické interferometrie a její využití při měření indexu lomu v optických materiálech. Na základě těchto znalostí bylo úkolem navrhnout holografické měřicí uspořádání pro měření indexu lomu v optických materiálech. Další částí bylo sestavení navrženého měřicího uspořádání a provedení měření pro daný materiál. Posledním bodem bylo zpracování naměřených dat a zhodnocení dosažených výsledků.

V teoretické části bakalářské práce byla provedena rešerše základních fyzikálních principů optiky se zaměřením na holografii, digitální holografii a holografickou interferometrii. V dalším bodě bylo navrženo a sestaveno měřicí uspořádání pro měření rozložení indexu lomu v optických materiálech. Toto navržené uspořádání vychází principiálně z Mach-Zenderova interferometru s několika úpravami pro konkrétní aplikaci digitální holografické interferometrie. Samotné měření bylo zrealizováno v Technické univerzitě v Liberci v optické laboratoři a probíhalo na zvoleném materiálu, kterým bylo sklo z výzkumného centra TOPTEC. K tomuto sklu byla zároveň dostupná imerze, která měla stejné optické vlastnosti jako použité sklo a je pro toto měření nezbytná. Výsledky z měření v podobě hologramů byly uloženy a dále zpracovány. Pomocí Fresnelovy aproximace bylo z každého měření numericky vypočteno fázové pole, které bylo dále filtrováno a výsledná interferenční fáze rozbalena do finálního výsledku. Tímto postupem bylo ověřeno, že pomocí digitální holografické interferometrie lze měřit rozložení indexu lomu v optických materiálech. Při měření použitého skla v místě s homogenním rozložením indexu lomu se fáze vzájemně odečetly a na výsledném fázovém poli nebyla vidět zřetelná interferenční struktura. Když však bylo měřeno dané sklo v místě, kde rozložení indexu lomu bylo nehomogenní, tak se změna rozložení indexu lomu ve výsledném fázovém poli zobrazila odpovídající interferenční strukturou.

Tato práce byla zaměřená na měření rozložení indexu lomu pouze v řezu vybraného materiálu a výsledky jsou tím pádem dvourozměrné. Pro širší použití této metody je

třeba přidat do měření i třetí rozměr, aby bylo možné lokalizovat měřenou nehomogenitu v celém objemu. To už je však časově výrazně náročnější proces, ale vzhledem k tomu, že toto téma je velice perspektivní a daná metoda by mohla mít v budoucnu široké uplatnění (a to nejen ve výrobě optického vybavení, ale také v právě budovaném výzkumném centru Extreme Light Infrastructure v Dolních Břežanech), tak bych se vývoji této metody rád věnoval i nadále ve své diplomové práci, kde bych navázal na znalosti a poznatky z této bakalářské práce.

## Seznam použité literatury

- [1] FIALA, P., RICHTER, I., RYZÍ, Z.: *Optika a moderní technologie* [online]. [cit. 2012-03-20]. URL: <<http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/optika/optika.html>>
- [2] GOODWIN, E. P., WYANT, J. C.: *Field Guide to Interferometric Optical Testing*. Bellingham, Washington, 2006. 100 s. ISBN 0-8194-6510-0
- [3] KREIS, T.: *Handbook of Holographic Interferometry : Optical and Digital Methods*. Berlin : Wiley, 2004. 542 s. ISBN 3-527-40546-1
- [4] MILER, M.: *Holografie* Praha : SNTL, 1974. 272 s. ISBN 04-002-74
- [5] PAVELEK, M., JANOTKOVÁ, E., ŠTĚTINA, J.: *Vizualizační a optické měřicí metody* [online]. [cit. 2012-03-20]. URL: <<http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika/>>.
- [6] RASTOGI, P.K.: *Holographic Interferometry : Principles and Methods*. Berlin : Springer , 1994. 341 s. ISBN 0387573542
- [7] REICHL, J., VŠETIČKA, M.: *Encyklopedie fyziky: vlnová optika* [online]. [cit. 2012-02-05]. URL: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/450-vlnova-optika>>
- [8] SALEH, B. E. A., TEICH, M. C.: *Fundamentals of Photonics*. Praha : MATFYZPRESS, 1994. 1056 s. (in Czech). ISBN 80-85863-01-4
- [9] SCHNARS, U., JUEPTNER, W.: *Digital holography*. Berlin : Springer, 2005. 164 s. ISBN 3-540-21934-X
- [10] SMITH, P., J.: *Ceravolo Optical Systems Fringe Analysis* [online]. [cit. 2012-02-05]. URL: <[http://www.ceravolo.com/fringe\\_examples.html](http://www.ceravolo.com/fringe_examples.html)>
- [11] Wikipedie: *Youngův experiment* [online]. [cit. 2012-05-07]. URL: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Young%C5%AFv\\_experiment](http://cs.wikipedia.org/wiki/Young%C5%AFv_experiment)>